



TITLE:

衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

青木, 克比古

CITATION:

青木, 克比古. 衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法に関する研究. 京都大学, 2000, 博士(情報学)

ISSUE DATE:

2000-01-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3164170>

RIGHT:

衛星通信用
オフセット形反射鏡アンテナの
鏡面修整法に関する研究

2000 年 1 月

青木克比古

衛星通信用
オフセット形反射鏡アンテナの
鏡面修整法に関する研究

2000 年 1 月

青木克比古

摘 要

本論文は、筆者が京都大学超高層電波研究センターおよび三菱電機株式会社にて行った衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの新しい鏡面修整法に関する研究をまとめたものである。

近年の衛星の大型化・大電力化、デジタル技術の導入に伴い、地球局アンテナは小口径となり、アンテナに対し高能率・低雑音はもとより、静止軌道の有効利用のために、隣接衛星方向を含むサイドローブ特性の低サイドローブ化が要求されている。更に地球局アンテナのコストを低減したい、車載実装・屋上設置などアンテナの機械構造系と整合させたいなどの要求もある。加えて、周波数有効利用のため低交差偏波化も要求されている。

一方、衛星搭載用反射鏡アンテナでは、1つの1次放射器と1枚の反射鏡からなるオフセット形反射鏡アンテナ構成により、低コストで複雑なビーム形状、たとえば親子ビームなどの複ビームにより効率よくサービスエリアを照射しようという要求がある。

このような種々の要求に対し原理的に能率が高く、低サイドローブ特性を有しているオフセット形の複反射鏡アンテナが有効である。本研究は、以上のような背景のもとで衛星通信に用いるオフセット形反射鏡アンテナの設計法に関するものである。研究のテーマとしては、

- (1) 従来の円形開口に限らず、楕円を含む任意開口のオフセット形複反射鏡アンテナに適用できる新しい鏡面修整法の研究
- (2) 低交差偏波オフセット形楕円ビームアンテナや低サイドローブオフセット形楕円ビームアンテナおよび成形ビームアンテナなど各種オフセット形反射鏡アンテナの設計への上記(1)の鏡面修整法の応用

である。

従来の複反射鏡アンテナの鏡面修整法が開口位相と開口面分布に基づく設計法であるのに比べ、それとは異なる新しい概念として、開口波面に基づく鏡面修整方法を考案した。すなわち、従来の設計法のほとんどが鏡面修整の幾何光学的条件である鏡面上の反射の法則、電力保存の法則および光路長一定の法則の3条件に、オフセット形アンテナであることによる可積分条件を加えた4条件より求められる連立偏微分方程式を数値積分することにより、幾何光学的に厳密に鏡面座標を求める鏡面修整法である。この方法は幾何光学的に厳密な解を与えうるものである。しかしながら、与える1次放射器からの放射パターンと開口面分布とがいずれも回転対称である場合への適用を考慮したものである。従って、楕円ビームアンテナへの適用が難しいなどの欠点がある。

これに対し本研究ではオフセット形複反射鏡アンテナの鏡面設計法として、開口面での波面の形状と光路長一定の法則を基本としており、鏡面座標の決定は以下の通りである。

主および副反射鏡の2枚の反射鏡からなるオフセット形複反射鏡アンテナにおいて、初期値としての回転2次曲面鏡系を与え、鏡面修整関数により副反射鏡を変化させ、開口面上で平面波を実現するように、副反射鏡上で反射の法則を適用し、光路長一定の法則より主反射鏡の鏡面を求める。更に、各反射鏡位置での波面上での電力保存を用いて、主反射鏡上の電界分布を求め、電流分布法により遠方放射パターンを計算する。この放射パターンの所望値が得られるまで、摂動的に鏡面修整関数のパラメータを変化させ、主・副反射鏡の鏡面座標を決定する。

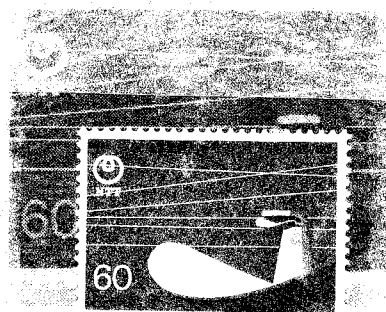
この方法は次の特長がある。

- ① 開口形状および開口面分布は鏡面修整関数を適当に選択することにより任意のものができると、設計法に汎用性がある。
- ② 1次放射器からの放射パターンは実際の1次放射器のものをを用いるため設計したアンテナは幾何光学的には厳密である。
- ③ 鏡面形状は関数で与えられるため任意の点の座標が厳密である。

- ④ 連立偏微分方程式を解く必要はなく，比較的簡単なアルゴリズムでアンテナ設計が可能である．

第 2 章に本研究の鏡面修整法の基本の適用例として開口径が長径 4.7m 短径 2.3m の高能率楕円ビームを実現するオフセット形複反射鏡アンテナの設計法，構成および実測の特性について述べる．この様な楕円ビームを有するアンテナ方式は，アンテナの低コスト化・静止軌道の有効利用の観点から小形地球局アンテナの有力な方式となり，その後のアンテナの主流となった．

なお，このアンテナは昭和 60 年通信自由化を記念し，郵政省から発行された右図の「郵便切手」の図柄に用いられた．



第 3 章では高能率を保ちながら，低交差偏波特性を有するオフセット形楕円ビームアンテナを設計するために，第 2 章に述べた鏡面修整法を改良した．アンテナ設計においては電氣的条件と機械的条件を同時に満足するにあたり，従来の方法ではいずれも電氣的条件を満足する解を求め，機械的条件を満たすまで数値計算を繰り返す必要があった．ここでは，これらを同時に満足する初期値を見出すため，オフセット鏡面の回転対称鏡面への置き換えによる手法を考案した．この研究を，機械的条件を満足し，高効率でかつ低交差偏波特性を有する，開口径が長径 2m，短径 1m のオフセット形楕円ビームアンテナの設計に適用し，所望の性能を得た．

第 4 章では，第 3 章で述べた主および副反射鏡からなるオフセット形 2 枚鏡アンテナでの鏡面修整法を 3 枚鏡アンテナの鏡面修整法に拡張した．このアンテナ設計法は比較的大型のオフセット形アンテナにおいて，低コストで，高能率で交差偏波特性の優れた性能を有する衛星通信地球局アンテナなどの設計に有効である．この設計法を開口径 5.5m のオフセット 3 枚鏡アンテナに適用し，所望の性能を得た．

第 5 章では，きわめて低サイドローブレベルの性能を要求される楕円ビームオフセット形複反射鏡アンテナにおいて，アンテナを製作後，アンテナ設計法

の誤差やアンテナの製作誤差などにより所望のサイドローブ特性が得られないことが判明する場合があります，その場合のサイドローブ特性を改善する手法を示す．この手法として，主もしくは副反射鏡を多数の部分鏡面に分割し，それぞれの相対位置を変えることにより開口面上の位相分布を制御し，所望の性能を得る鏡面分割構成法を考案した．この手法を開口径が長径 1.8m, 短径 1.3m のオフセット楕円ビームアンテナに適用し，その有効性を確認した．この手法は，第 2 章の鏡面修整法の変形であり，実験的に鏡面修整量を求めていくという点に特徴がある．

第 6 章では，より複雑なビーム断面形状を有する成形ビームアンテナで，例えば主ビームとそれに比べ低いレベルの副ビームの複ビームを放射するオフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法として平面波合成法を述べている．この設計法を日本列島を照射する衛星搭載の成形ビームアンテナに適用し，所望の性能を得た．なお，この成形ビームアンテナの最適設計方法として，直接探索法の一つである実験計画法を用いた．この平面波合成法は衛星搭載アンテナに限らず，地球局アンテナの複ビーム化に有効な設計法といえる．

将来の展望として，本研究によるアンテナ設計法は，その設計の汎用性ゆえに，将来的には任意の複雑なビーム断面形状を持つ反射鏡アンテナ，例えば楕円開口の 3 枚鏡アンテナ，楕円ビームと円形ビームの複合ビームを有するアンテナ，更には衛星通信以外の成形ビームレーダアンテナなどの設計に応用できる．

パラメータ表

$A(u)$	開口分布
a_r	2 次曲面鏡に関する定数
a_m	主反射鏡に関する定数
a	主ビームを放射する電界に対して,ベクトル ξ の方向に平面波を放射する電界の振幅比
a_s	副反射鏡の定数で, $OF = 2a_s e_s$
B	$H / \sin \theta$
b	3 枚鏡アンテナにおいて 1 次放射器の位相中心 F_0 を起点とした主反射鏡の焦点 F_1 の位置ベクトル (定ベクトル)
$C_i (i = 1, 2, \dots, 9)$	光路長一定に関する定数
D_m, D_1, D_2	主反射鏡の開口径(回転対称の場合 D_m , 楕円開口の場合 D_1, D_2)
D_s	副反射鏡の開口径
d	1 次放射器の位相中心点 F を起点とする,波面上の点 W の位置ベクトル
dS_{w1}	1 次放射器からの波面 W_1 上の面素
dS_{w2}	主反射鏡に入射する波面 W_2 上の面素
E_{m2}, E_{m1}	鏡面上の点 M での電界で,ベクトル ξ の方向に平面波を放射する電界と主ビームを放射する電界
$E_S (\Theta, \Phi)$	遠方の観測点 $P(R_p, \Theta, \Phi)$ で観測される電界
E_{w1}	1 次放射器からの波面 W_1 上の電界

E_{w_2}	主反射鏡に入射する波面 W_2 上の電界
$E_p(\theta), E_p(\hat{\phi})$	1 次放射器から副反射鏡(もしくは#1 反射鏡)への放射電界
$E_d(u), E_d(\eta), E_d(\hat{\theta})$	主反射鏡(もしくは鏡面)の開口での電界分布
E_θ, E_ϕ	1 次放射器からの放射電界の (θ, ϕ) 成分
E_{m0}	平面波合成において主ビームを放射する電界の振幅
$\bar{E}_\theta, \bar{E}_\phi$	E_{w_2} に関連する電界の (θ, ϕ) 成分
e_θ, e_ϕ	(θ, ϕ) に沿う単位ベクトル
e_r	1 次放射器の位相中心点 F から副反射鏡上の点 S に向かう単位ベクトル
e_s	副反射鏡上の点 S から主反射鏡上の点 M に向かう単位ベクトル
$e_n(\Theta, \Phi)$	部分鏡面からの遠方点 P に寄与する電界
e_1	3 枚鏡アンテナでの 1 次放射器の位相中心点 F_0 から#1 反射鏡上の点 R_1 に至る単位ベクトル
e_2	3 枚鏡アンテナでの#1 反射鏡上の点 R_1 での反射光線の方 向の単位ベクトル
e_3	3 枚反射鏡系の#2 反射鏡上の点 R_2 での反射光線の方 向の単位ベクトル
e_t	開口波面の周辺部(線織面)に沿う単位ベクトル
e_m	1 次放射器の位相中心 F から鏡面上の点 M までの単位ベクトル
e_{rw}	開口波面の波面中央部の法線ベクトル
$\bar{e}_\theta, \bar{e}_\phi$	$(\bar{\theta}, \bar{\phi})$ に沿う単位ベクトル
e_s, e_{sx}	副反射鏡, 鏡面定数の異なる回転対称 2 次曲面鏡群で 2 枚反射鏡系を置き換えた時の副反射鏡の離心率(添字 x で示す)
e_{sc}	2 枚鏡アンテナでの置き換え鏡面系 C の副反射鏡の離心率
\bar{e}	δpe

e_{m1}, e_{m2}	3 枚鏡アンテナの交差偏波消去条件を満足する鏡面系の #1, #2 反射鏡の離心率
e_{10}, e_{20}	3 枚鏡アンテナの鏡面系 B(修整前) の #1, #2 反射鏡の離心率
e_1, e_2	3 枚鏡アンテナの鏡面系 C(修整後) #1, #2 反射鏡の離心率
f	原点 O を起点とする 1 次放射器の位相中心 F の位置ベクトル
$f_i(\theta, \phi), i=1, \dots, 4$	修整鏡面の鏡面修整関数で曲座標 (θ, ϕ) の関数
f_m, f_{mx}	主反射鏡, 鏡面定数の異なる回転対称 2 次曲面鏡群で 2 枚反射鏡系を置き換えた時の主反射鏡の焦点距離(添字 x で示す)
f_{mc}	2 枚鏡アンテナの置き換え鏡面系 C の主反射鏡の焦点距離,
$G_{p(j)},$	鏡面修整関数 f_4 の構成要素で鏡面修整関数のパラメータ (G_1, G_2)
H_{w2}	主反射鏡への入射する波面 W_2 への入射磁界
H_i	1 次放射器から放射される鏡面への入射磁界
$H_{q(j)}$	鏡面修整関数 f_4 の関数の構成要素で鏡面修整関数のパラメータ (H_1, \dots, H_9)
(i_1, j_1, k_1)	1 次放射系の座標系 (X_1, Y_1, Z_1) の各 X_1, Y_1, Z_1 に沿う単位ベクトル
(i, j, k)	主反射鏡の座標系 (X, Y, Z) の各 X, Y, Z 軸に沿う単位ベクトル
$J_0(u)$	0 次の第一種ベッセル関数
K	楕円の長軸と短軸の比 (≥ 1)
k	波数で $\lambda/(2\pi)$
$L_1, L_2, L_3, L_4:$	3 枚鏡アンテナにおける鏡面系 A, B, C, D のパラメータで, それぞれ $\overrightarrow{F_0H_0}, \overrightarrow{H_0F'}, \overrightarrow{F'S_0}, \overrightarrow{S_0F_1}$ に対応する距離
l	2 次曲面鏡の一方の焦点 F から他方の焦点 F' に向かう単位ベクトル
n_m	主反射鏡(もしくは鏡面)上の任意の点 M での法線ベクトル
n_p	波面の周辺部(線織面)の法線ベクトル

\mathbf{n}_w	波面上の点 W における法線ベクトル
\mathbf{n}_s	副反射鏡上の点 S での法線ベクトル
\mathbf{n}_1	点 R_1 における法線ベクトル
p	1 のとき回転双曲面鏡、-1 のとき回転楕円面鏡
P_x	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで、副反射鏡の頂点 V_x から主反射鏡の焦点 F_1 までの距離
P_0, P_1, P_2	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータ P_x に対応する副反射鏡の頂点から主反射鏡の焦点 F_1 までの距離
\hat{P}_1	$\overrightarrow{F_0 H}$ の距離
Q_1, Q_2, Q_3, Q_4	3 枚鏡アンテナにおける鏡面系 A, B, C, D のパラメータで、 $\overrightarrow{F_0 H_0}, \overrightarrow{H_0 F'}, \overrightarrow{F' S_0}, \overrightarrow{S_0 F_1}$ に対応する距離
R_x	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで、1 次放射器の位相中心 F_0 から副反射鏡の頂点 V_x までの距離
R_0, R_1	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータ R_x に対応する、1 次放射器の位相中心点 F_0 から副反射鏡の頂点までの距離
R	1 次放射器の位相中心（焦点に対応）の点 F から鏡面上の点 M までの距離
R_m	副反射鏡上の点 S から主反射鏡上の点 M までの距離
R_p	主反射鏡上の定点 M_0 から観測点 P までの距離
$R_s(\theta, \phi)$	2 枚鏡アンテナにおいて 1 次放射器の位相中心（焦点に対応）の点 F から 副反射鏡上の点 S までの距離で副反射鏡の形状を表す (θ, ϕ) の関数
R_w	主反射鏡上の点 M と波面上の点 W との距離
R_{m0}	1 次放射器の位相中心（焦点に対応）の点 F から鏡面上の点 $M_0(\theta=0 \text{ に対応})$ までの距離

$R_1(\theta_1, \phi_1)$	3 枚鏡アンテナにおいて 1 次放射器の位相中心（焦点に対応）の点 F_0 から点 R_1 に至る距離 #1 で反射鏡の形状を表す (θ_1, ϕ_1) の関数
R_2	3 枚鏡アンテナにおいて点 R_1 から点 R_2 までの距離
\mathbf{r}_m	1 次放射器の位相中心点 F を起点とした主反射鏡上の点 M の位置ベクトル
\mathbf{r}_{m0}	点 F_0 を起点とした主反射鏡上の定点 M_0 の位置ベクトル
\mathbf{r}_{r2}	3 枚鏡アンテナにおいて, 1 次放射器の位相中心点 F_0 を起点とした点 R_2 の位置ベクトル
\mathbf{r}_p	主反射鏡(もしくは反射鏡)上の点 M_0 から遠方の観測点 P に向かう単位ベクトル
\mathbf{r}_{w1}	1 次放射器の位相中心（焦点に対応）の点 F を起点とした点 S の波面 W_1 上での位置ベクトル
\mathbf{r}_{w2}	1 次放射器の位相中心（焦点に対応）の点 F を起点とした点 M の波面 W_2 上での位置ベクトル
$\bar{\mathbf{r}}_p$	平面波合成により鏡面修整後の鏡面上の点 \bar{M}_0 から遠方の観測点 P に向かう単位ベクトル
$r_0(\theta, \phi)$	2 枚鏡アンテナにおいて副反射鏡の形状を表す基準となる 2 次曲面鏡の曲座標表示
$r_0(\theta_1, \phi_1)$	3 枚鏡アンテナにおいて #1 反射鏡の形状を表す基準となる 2 次曲面鏡の曲座標表示
r_x	回転対称鏡面から構成される 2 枚鏡アンテナにおいて, 1 次放射器の位相中心 F_0 から副反射鏡上の点 S_x までの距離
r_{sw}	波面 W_2 に関し $r + r_{sw}$ が定数
r_w	波面 W_1 に関する定数
(R_p, Θ, Φ)	遠方の観測点 P を表す曲座標表示
(r, θ, ϕ)	1 次放射器のホーン軸に沿う座標系
$Q, q,$	Q dB とその真数

S_1, S_2	2 枚鏡アンテナの鏡面系置き換えにおけるパラメータで, $\overline{F_0 H_0}$ の距離
S_1, S_2, S_3, S_4	3 枚鏡アンテナの鏡面系置き換えにおけるパラメータで, $\overline{F_0 H_0}$ $\overline{F' H_0}$ $\overline{F' S_0}$ $\overline{S_0 F_1}$ の距離
S_s	周辺部の線織面に沿う距離
t	θ/θ_0
u	主反射鏡の径方向の正規化半径
X, Y, Z	1 次放射器の位相中心 (焦点に相当) F を原点とする反射鏡系の座標
X_1, Y_1, Z_1	1 次放射器の位相中心 (焦点に相当) F を原点とし、その軸を Z_1 軸とする座標系
x, y, z	主反射鏡上の定点 M_0 を原点とする座標系 (遠方界を計算するための座標系)
x_1, x_2, x_3	鏡面修整関数の大きさを表すパラメータ
y_j	鏡面修整関数の大きさを表すパラメータ
$\bar{\mathbf{n}}_m$	平面波合成による鏡面修整後の鏡面上の点 $\bar{\mathbf{M}}$ での法線ベクトル
$\bar{\mathbf{r}}$	点 O から平面波合成による鏡面修整後の鏡面上の点 $\bar{\mathbf{M}}$ へ向かう単位ベクトル
$\Delta \Theta$	衛星のオフセット角度 (静止軌道の中心位置からの衛星の変位角度)
$\Delta t, \Delta t_n$	金属板の厚み
$\Delta \mathbf{r}_m$	平面波合成による修整鏡面の変位量(ベクトル量で大きさは Δr_{m1})
Δr_{m1}	平面波合成による修整鏡面の変位量の大きさ
Ψ	平面波合成による修整鏡面の変位により生ずる位相シフト量
Ψ_0	主ビームを放射する電界に対して、ベクトル ξ の方向に平面波を放射する電界の位相差

$\Psi_n \Psi_a \Psi_b$	鏡面分割構成法で鏡面からの放射電界の位相項を表すパラメータ
Θ	ビーム正面方向からの離角 (度)
(Θ, Φ)	遠方 P 点の曲座標表示の角度成分
Θ/Θ_{-3}	3dB ビーム幅(Θ_{-3})で正規化されたビーム正面方向からの離角
ξ	平面波の方向の単位ベクトル
ρ	主反射鏡(もしくは反射鏡)鏡面上の点 M_0 から M へのベクトル ($\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_{m0}$)
$\bar{\rho}$	平面波合成により鏡面修整された鏡面上の点 \bar{M}_0 から \bar{M} へ向かう 単位ベクトル
α	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで, F_1F_2 と Z 軸とのなす角
β	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで,点 F_1 を頂角として副反射鏡を見込む円錐の軸と Z 軸とのなす角
δ	1 のとき凹面鏡、-1 のとき凸面鏡
ε	等価オフセットパラボラのオフセット角
η	反射鏡からの反射光線方向 (鏡軸からの角度)
η_a	開口能率
η_0	自由空間の特性インピーダンス
γ	2 枚鏡アンテナでの鏡面系のパラメータで F_1S と SM との成す角
λ	波長
θ, ψ	回転対称鏡面の鏡面修整に関する角度パラメータ(図 1.7)
(θ, ϕ)	2 枚鏡アンテナの 1 次放射器に沿う曲座標系の角度成分
(θ_1, ϕ_1)	3 枚鏡アンテナにおいて 1 次放射器の沿う曲座標系の角度成分
$\theta(\theta_1)$	1 次放射器の位相中心点 F(もしくは F_0)から副反射鏡(もしくは #1 反射鏡)への光線の中心軸からのなす角

θ_0	1 次放射器の位相中心点 F から副反射鏡の周辺を見込む円錐の半頂角
θ'	2 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系において、副反射鏡からの反射光線が中心軸となす角度(図 3.10)
θ_n	部分鏡面への入射角
θ_{fc}	鏡面系 C の主反射鏡の開口角 (半値)
$\hat{\gamma}$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで、 $\overrightarrow{F_0H_0}$ と Z 軸とのなす角
$\hat{\alpha}$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで、 $\overrightarrow{FS_0}$ と Z 軸とのなす角
$\hat{\beta}$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで、 $\overrightarrow{S_0F_1}$ と Z 軸とのなす角
$\hat{\phi}$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系において 1 次放射器から #1 反射鏡への光線が中心軸となす角度
$\hat{\phi}_0$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系への置き換えのパラメータで点 F_0 から #1 反射鏡の周辺を見込む半頂角
$\hat{\theta}$	$\hat{\phi}$ に付随する角度で (図 4.6 に示す角度)
$\hat{\theta}_0$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系において主反射鏡の焦点 F_2 から主反射鏡の周辺をみた開き角 (半値)
$\hat{\theta}'$	3 枚鏡アンテナにおける回転対称鏡面系において、#1 反射鏡からの反射光線が中心軸となす角度 (図 A-1)
σ	F_1 が光線の進行方向にあるときは 1, ないときは -1
ζ	G_1, G_2 の開口分布に関するパラメータ
(z, u, ϕ')	アンテナ開口の円筒座標系

図・表の英語名称の日本語訳

Antenna aperture	アンテナ開口
Aperture efficiency	開口能率
Aperture field distribution	開口面分布
Az axis/ El axis	俯角軸/仰角軸
Az plane/ El plane	俯角面/仰角面
Beam waveguide feed	集束ビーム給電
Circular beam	円形ビーム
Contoured beam	成形ビーム
Co-pol. /Cross pol.	主偏波/交差偏波
Corrugated horn	コルゲートホーン
Current distribution method	電流分布法
Ellipsoidal reflector	楕円鏡
Elliptical beam	楕円ビーム
Equivalent offset paraboloidal reflector	等価オフセットパラボラ反射鏡
Feed point	給電点
Feed	給電装置
Geostationary arc	静止軌道
Horn aperture	ホーン開口
Horn array	ホーンアレー
Horn reflector	ホーンレフレクタ
HPA	大電力増幅装置
Hyperboloidal reflector	双曲面鏡
LNA	低雑音装置
Longitudinal plane	縦断面
Main reflector	主反射鏡

Near-axis radiation pattern	近軸放射パターン
Observation point	観測点
Off-beam loss	オフビーム損失
Offset Cassegrain antenna	オフセットカセグレンアンテナ
Offset dual-reflector antenna	オフセット形複反射鏡アンテナ
Offset Gregorian antenna	オフセットグレゴリアンアンテナ
Primary horn	1次放射器
Quadric surface of revolution	回転2次曲面鏡
Reflector aperture shape	開口形状
Reflector shaping function	鏡面修整関数
Ruled surface	線織面
Setting error	設定誤差
Shaped reflector	修整鏡面
Spill-over power	漏洩電力
Spherical surface	球面
Subreflector	副反射鏡
Surface element	面素
Surface error	鏡面誤差
Transversal plane	横断面
Tri-reflector antenna	3枚鏡アンテナ
Wavefront	波面
Wide-angle radiation pattern	広角サイドローブ特性

目 次

第1章 序 論

- 1.1 研究の背景
- 1.2 従来の反射鏡アンテナの鏡面修整に関する研究の概要
- 1.3 本研究の概要
 - 1.3.1 新しい鏡面修整法の研究
 - 1.3.2 各種オフセット形反射鏡アンテナの設計への本鏡面修整法の応用

第2章 鏡面修整関数による鏡面修整法

- 2.1 まえがき
- 2.2 鏡面設計法
 - 2.2.1 鏡面座標
 - 2.2.2 鏡面上の電流分布と放射電界
- 2.3 鏡面修整関数
- 2.4 高能率オフセット形楕円ビームアンテナの設計と実測結果
 - 2.4.1 地球局アンテナに要求される楕円ビームアンテナ
 - 2.4.2 鏡面系の構成と試作アンテナ
 - 2.4.3 放射特性の実測結果
- 2.5 むすび

第 3 章 交差偏波オフセット形複反射鏡アンテナの設計法

3.1 まえがき

3.2 鏡面設計法

3.2.1 2 次曲面鏡の設計パラメータ

3.2.2 設計の基本原理

3.2.3 設計手順

3.3 回転対称鏡面系への置き換え

3.3.1 鏡面系 B から C への置き換え

3.3.2 鏡面系 C から D への置き換え

3.4 適用例

3.4.1 楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナの設計と実測結果

3.4.2 円形開口オフセット形カセグレンアンテナの設計

3.5 むすび

第 4 章 低交差偏波オフセット形 3 枚鏡アンテナの設計法

4.1 まえがき

4.2 鏡面設計法

4.3 鏡面置き換え法の 3 枚鏡系への適用

4.4 低交差偏波オフセット形 3 枚鏡アンテナの設計と実測結果

4.5 むすび

第5章 低サイドローブオフセット形複反射鏡アンテナの設計法

- 5.1 まえがき
- 5.2 鏡面設計法
 - 5.2.1 目標性能
 - 5.2.2 設計方針
 - 5.2.3 試作したアンテナ
 - 5.2.4 測 定
- 5.3 サイドローブレベルの抑圧
 - 5.3.1 鏡面分割構成法の原理
 - 5.3.2 θ_n の決定法
 - 5.3.3 実施例
 - 5.3.4 最終性能
- 5.4 むすび

第6章 平面波合成法による成形ビームアンテナの設計法

- 6.1 まえがき
- 6.2 平面波合成法による設計法
- 6.3 放射パターン
- 6.4 設計例
- 6.5 平面波合成法による最適設計
 - 6.5.1 最適設計の考え方
 - 6.5.2 アンテナの設計パラメータ

6.5.3 計算機を用いた最適設計の効率化

6.5.4 国内通信衛星アンテナの最適設計

6.6 むすび

第7章 結 論

謝 辞

参考文献

文献リスト

付 録

第1章

序 論

1.1 研究の背景

1960年に米国が打ち上げたエコー(Echo)1号によって、人類史上初めて人工衛星による遠距離通信が始まった。その後、各種の衛星実験を経て、1964年には現在の衛星通信の雛形である静止衛星シンコム(Syncom)3号が打ち上げられ、1965年にはインテルサット(INTELSAT)1号(アーリーバード:Early Bird)が打ち上げられた。この衛星により、商業通信として人工衛星による国際衛星通信サービスが開始された。その後、今日にいたるまで、国際衛星通信サービスはインテルサット系の衛星(1998年時点でインテルサット8号)などを利用した電話、TV、データ通信に広く普及、進展してきている。1972年には、国際衛星通信から地域(北米、ヨーロッパなど)衛星通信へ、更には、地域衛星通信から国内衛星通信へとますますそのサービスが拡大した。

わが国では、1977年に国の主導で国内衛星通信サービスが、続いて1990年には民間による国内衛星通信サービスが始まった。通信メディアとしての衛星通信の特徴を生かした、TV伝送、非常通信などに大いに普及している。1995年には国内で、移動体の衛星通信サービスが新たに開始され、今後も衛星通信はさらに発展し、高速通信、マルチメディア通信に有効な役割を担うものと期待されている。

衛星通信は宇宙局すなわち、人工衛星を介して地球局相互間の通信であり、衛星通信の発展は宇宙局と地球局の連携においてなされてきた。衛星通信の初期においては人工衛星は小型であったため大型の地球局を必要とした。しかしながら、近年は人工衛星の大型化、デジタル技術化などの技術的発展に伴い、地球局の小型化が進んでいる。

このような衛星通信の進展の中で、地球局を構成する衛星通信地球局アンテナに要求される技術的条件として、

- (1) 高能率・低雑音であること
- (2) 衛星追尾ができること
- (3) 良好な交差偏波特性を有していること
- (4) 良好な広角サイドローブ特性を有していること
- (5) 所要のビーム形状を有していること

などが挙げられる。これらの技術的条件は衛星通信の進展に伴い、初期の時代には条件(1)と(2)が要求され、衛星通信の需要の増大に伴って条件(3)と(4)が加わり、最近では更に(5)が加わるなど変遷してきている。

一方、衛星搭載用アンテナについても同じような要求条件がなされてきており、反射鏡アンテナに要求される技術的条件としては、上記の(3)、(4)および(5)が挙げられる。

このような要求条件に対し、以下にこれまでになされた主たる研究を概観する。

衛星通信の初期の時代においては、使用する衛星を追尾するためアンテナ全体を駆動する全天指向形の 30m 級の図 1.1 に示すような主反射鏡、副反射鏡及び 1 次放射器から構成されるカセグレンアンテナ (Cassegrain antenna) が実用化された。

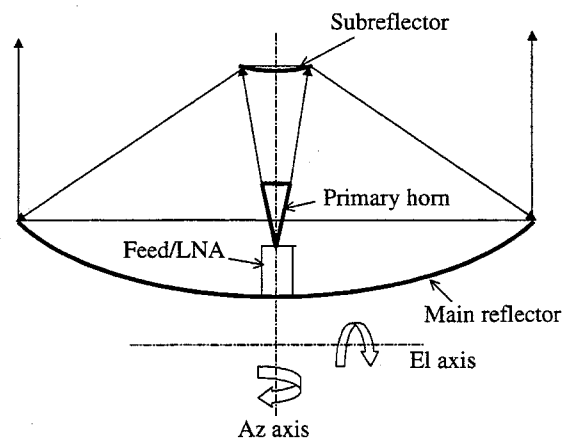


図 1.1 カセグレン アンテナ
Fig.1.1 Cassegrain Antenna

この方式では送信機や受信機などの電子機器が、直交する 2 つの軸例えば俯角(Azimuth)と仰角(Elevation)の各軸まわりのアンテナ回転に連動するため、電子

機器の取付け空間の制約やその保守・運用の利便性に欠けるなどの欠点がある。その欠点を解消しようとして、アンテナが仰角回りに回転しても電子機器が連動しないように工夫した、図 1.2 に示すような 1 次放射器としてホーンレフレクタアンテナを用いたニアフィールドカセグレンアンテナが実用化された。

これらの複反射鏡アンテナの実用化のために、1961 年にはカセグレンアンテナの研究が Hannan [1]によってなされ、その後、複反射鏡アンテナの鏡面修整による高能率・低雑音化の研究が Kinber[2], 喜連川ら[3]によってなされた。

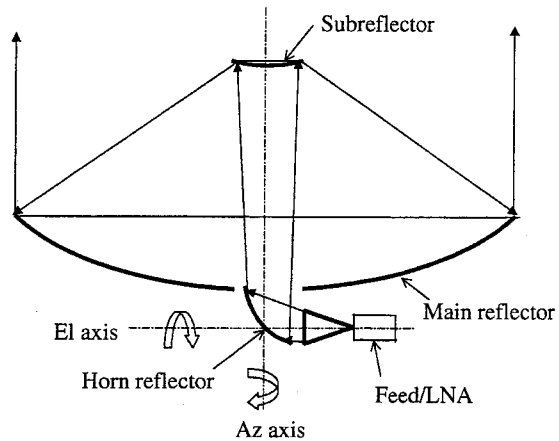


図 1.2 ホーンレフレクタ給電カセグレンアンテナ

Fig.1.2 Horn reflector fed Cassegrain antenna

この鏡面修整は後述するように、電波天文において一般的であった回転放物面鏡(パラボラ)の主反射鏡、回転双曲面鏡の副反射鏡及び 1 次放射器とからなるカセグレンアンテナを、電磁波動的に最適化しようと各々の鏡面をそれぞれ放物面、双曲面から修整するものである。このような鏡面修整により、通常カセグレンアンテナに比べ開口能率において 20%以上、雑音温度において 20K 以上、アンテナ性能が向上した。

その後、更なる電子機器の拡張性及びその保守・運用の利便性をめざして電子機器を地上に固定するアンテナ形式として、図 1.3(a), (b)に示す 2 枚の集束反射鏡や 4 枚の集束反射鏡を用いる集束ビーム給電方式のカセグレンアンテナが実用化された[4], [5]。2 枚の集束反射鏡を用いる給電方式は比較的小さい 10m 級の全天指向形アンテナに、4 枚を用いる給電方式は 30m 級の全天指向形アンテナにそれぞれ適用された。

このアンテナ方式は、電波天文ではクーデ(Coudé)焦点とよばれる位置に 1 次放射器を配置するもので、集束ビーム給電系によりカセグレン焦点を地上付近のクーデ焦点に置き換える方式である。4 回反射形の場合、仰角回転では主・副

反射鏡および第4反射鏡が、更に俯角回転では1次放射器をのぞくアンテナ全体が回転する。従って、1次放射器とそれに接続される電子機器は地上に固定されることになる。

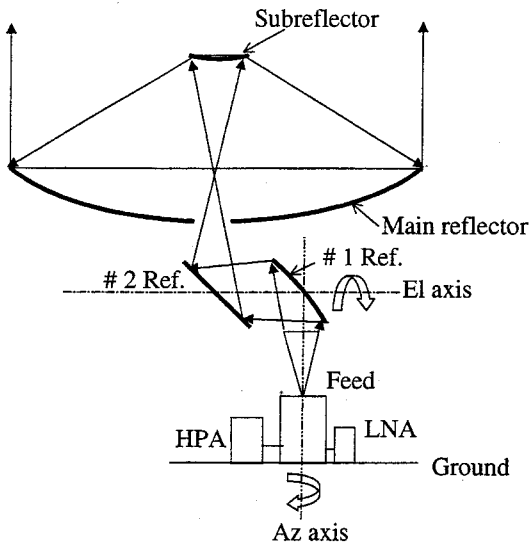


図 1.3(a) 集束ビーム給電 カセグレンアンテナ(2回反射形の場合)

Fig. 1.3(a) Beam waveguide fed Cassegrain antenna(2-reflector case)

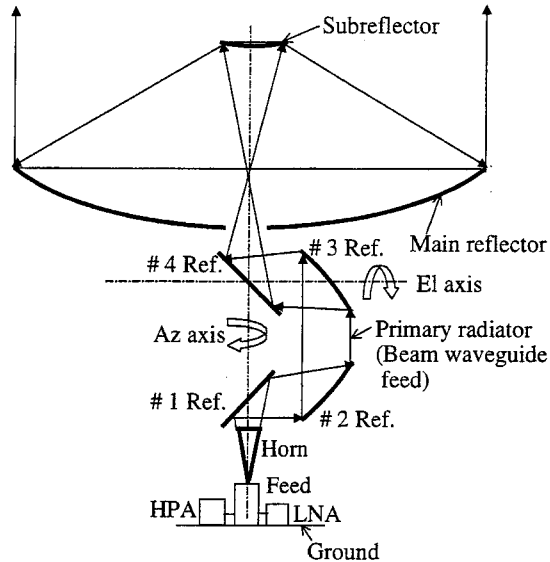


図 1.3(b) 集束ビーム給電 カセグレンアンテナ(4回反射形の場合)

Fig. 1.3(b) Beam waveguide fed Cassegrain antenna (4-Reflector case)

更に、衛星通信の需要の増加にともない、通信方式として直交する2偏波の利用により2倍の通信容量を確保しようとする直交2偏波による周波数再利用方式が導入され、送信機・受信機の拡張性に有利な集束ビーム給電方式のカセグレンアンテナが多用された[6]。この集束ビーム給電方式のアンテナについては1961年に伝送効率の観点から集束ビーム伝送の研究がGoubau[7]によってなされ、一方集束ビーム給電系に使用される非回転対称反射鏡から発生する交差偏波成分を消去する研究が1973年水沢ら[8]によってなされた。この集束ビーム給電系を構成するにあたり必要な低サイドローブで回転対称ビームを放射できるコルゲート円錐ホーンの研究が橋本ら[9]によって研究された。更に、1983年片木ら[10]により、伝送効率と交差偏波成分を考慮した集束ビーム給電系の最適設計が研究された。この設計法を採用することにより、4枚の集束反射鏡からなる集束ビーム給電系において、伝送効率を約95%とし、交差偏波成分を-30dB以

下に、楕円偏波率に換算して 0.5dB 以下にすることができ、直交 2 偏波を利用する通信方式が可能となった。

更に、国際衛星通信から地域衛星通信、国内衛星通信へとその利用の拡大に伴い、多数の衛星を静止軌道上に配置する、いわゆる静止衛星の軌道の有効利用や地上マイクロ回線との同一周波数を利用する周波数共有が必要となり、地球局アンテナの広角サイドローブ特性の低サイドローブ化が要求された。図 1.4 は国際電気通信連合無線通信セクタ ITU-R で定めたアンテナの広角サイドローブ特性に関する

アンテナの設計目標の一例を示している。1980 年当時の目標値として、サイドローブレベルが $32 - 25 \log \Theta$ dBi ($1^\circ \leq \Theta \leq 48^\circ$)、 -10 dBi ($48^\circ \leq \Theta$) 以下となっている。(最近の目標値は $29 - 25 \log \Theta$, dBi に変更されている)

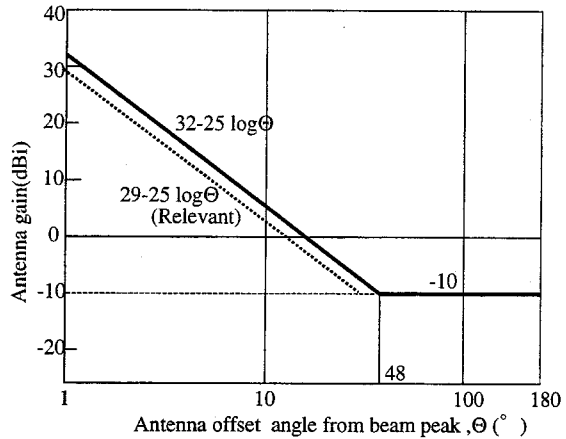


図 1.4 アンテナの広角サイドローブ特性の設計目標 (例)

Fig. 1.4 Design objective of antenna wide-angle sidelobe pattern

この目標値を満足する、通常回転対称形のカセグレンアンテナ[11]や、直径 10m 級のオフセット形式のカセグレンアンテナが実用化された[12]. 回転対称形のアンテナの広角サイドローブ特性の低サイドローブ化の研究が 1976 年別段ら[11], Kreutel[13]や 1981 年松中ら[14]によって、またオフセットカセグレンアンテナの広角サイドローブ特性の低サイドローブ化の研究が 1980 年小川, 高野ら[13]によってなされた。

前者では別段ら, Kreutel らは主として低サイドローブ特性を有する 1 次放射器による最適な副反射鏡への吹き付けと低サイドローブ特性を実現する鏡面修整について研究した。その結果、この回転対称形のカセグレンアンテナの広角サイドローブ特性は上記設計目標値を満足するものとなった。また、松中らは副反射鏡の支柱の断面形状を特殊な形状とすることにより、副反射鏡支柱からの散乱波によるサイドローブレベルを低減し、回転対称形のカセグレンアンテナの交差偏波を含む広角サイドローブ特性を更に改善した。

後者では、小川、高野らはオフセット形のカセグレンアンテナにおいて、主反射鏡や副反射鏡のエッジからの回折波や集束ビーム給電系からの散乱波、分割鏡面であるアンテナパネルの隙間からのもれ電力など各種の広角サイドローブ特性への寄与要因を研究し、先の設計目標値より 10dB 程度良好な低サイドローブ特性を有するオフセット形アンテナを実現した。このアンテナでは市街地設置を可能とするため、電波干渉を避けるための広角サイドローブ特性の低サイドローブ化に加え、主鏡面を水平設置することにより風荷重を低減し建物へのインパクトを少なくするように配慮されている。

その後、1980 年の後半に至り、衛星の大型化・大電力化、デジタル技術の導入に伴い、地球局は小規模になり、地球局アンテナはほとんど 10m 級以下の小口径となった。このアンテナには大口径アンテナ同様の高能率・低雑音はもとより、低サイドローブ特性と直交 2 偏波を利用するため低交差偏波特性が要求された。小さい口径のアンテナでは、電波的に必要な副反射鏡の大きさが制約となり、副反射鏡によるブロッキングによるアンテナ特性の劣化が顕著になり、数 m 級のアンテナ（対波長比 100 波長以下）では回転対称形の複反射鏡アンテナは使えない。そのため原理的に副反射鏡を電波通路から外す(オフセット)ことにより、そのブロッキングによる特性劣化が避けられる図 1.5 に示すオフセット形の複反射鏡アンテナが有効となった。

この方式のアンテナでは鏡面の非回転対称性により原理的に交差偏波が発生するため、その消去法について 1970 年水沢[16], 1973 年 Graham [17], 田中ら[18][19], 水口ら[20]によって幾何光学(Geometrical Optics)的取り扱いにより研究された。水沢らは等価オフセットパラボラという概念を導入し、任意な枚数の非回転対称の反射鏡で構成される集束ビーム給電系での非対称性を研究し、田中らはその非対称性から生ずる交差偏波特性を論じ、その消去法を研究した。

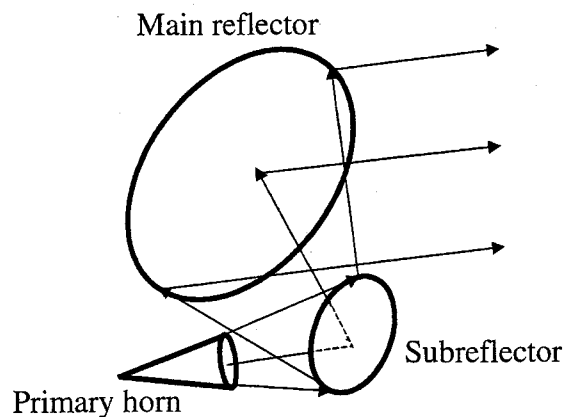


図 1.5 オフセット形複反射鏡アンテナ
Fig. 1.5 Offset dual-reflector antenna

更に、このような非回転対称アンテナでの鏡面修整法についても 1974 年水沢ら[21], 1979 年 Galindo ら[22]により幾何光学的な取り扱いにより研究された。田中らの鏡面修整法は、前述の回転対称形の複反射鏡アンテナの鏡面修整法をオフセット複反射鏡アンテナに拡張するもので、高能率特性を得る鏡面修整であった。Galindo らはその方法を改良し、高能率特性に加え、低交差偏波特性を得る鏡面修整を研究した。その後、Kinber が示したオフセット形複反射鏡アンテナでは厳密な鏡面修整の解は存在しないという示唆に対し、1986 年野本ら[24], Galindo ら[25]の研究により幾何光学的に厳密な解の存在が数値計算で示された。野本らによると、開口径 1.2m (対波長比 50) のオフセットグレゴリアンアンテナ(Offset Gregorian antenna)の設計例として、開口能率 72%, 広角サイドローブ特性 $25\text{-}25\text{ log}\Theta\text{dBi}$ 以下、交差偏波 -26dB を実現している[26]。

その後、オフセット形アンテナにおいて、静止衛星の静止精度の向上や地球局の経済化のためのアンテナの低コスト化を背景にアンテナ設計に対し次のようないろいろな要求が出された。

- ① 比較的大きな口径のオフセット形複反射鏡アンテナでの高能率・低雑音、低交差偏波、低サイドローブ特性の実現。
- ② 軌道の有効利用のため高密度に、例えば静止軌道上で 2° 毎に衛星を配置できるように、隣接衛星方向の低サイドローブ化と成形ビームの実現。
- ③ 車載実装、屋上設置などアンテナの実装面での機械構造系からの要求と電気的要求をあわせて可能にする電気設計。そのためには開口形状を従来の円形に限らず任意に選定できること。
- ④ 任意開口形状を有するオフセット形複反射鏡アンテナの高能率・低雑音、低サイドローブ、低交差偏波特性の実現。
- ⑤ 一方、衛星搭載用反射鏡アンテナでは、1つの1次放射器と1枚の反射鏡からなるオフセット形反射鏡アンテナ構成により、低コストで複雑なビーム形状、たとえば親子ビームなどの複ビームにより効率よくサービスエリアを照射できること。

本研究はこのような背景のもとでなされたもので、それぞれに対し次のような研究を行った。

①に対しては、比較的大きな口径のオフセット形アンテナを経済的に実現するためには主反射鏡をパラボラとし、主反射鏡を構成する分割鏡面を最少の種類にすることが有効であり、ここでは主反射鏡と1枚の副反射鏡と1枚の補助反射鏡の全体として3枚の反射鏡から構成されるアンテナで、副反射鏡と補助反射鏡を鏡面修整することにより、高能率・低雑音、低交差偏波、低サイドローブ特性を有するオフセットグレゴリアンアンテナを研究した。

②に関しては、通常の円形ビームでなく、アンテナ利得を保ちながら直交する2方向例えば俯角、仰角面内でのビーム幅を変えるいわゆる成形ビームとすることにより、隣接衛星の方向のサイドローブレベルを抑圧できる。この観点から、開口を楕円に近い扇形とし、その長軸対短軸の比をほぼ2:1としたオフセットカセグレンアンテナを研究した。このアンテナから放射されるビーム形状はアンテナ開口に対応する楕円ビームとなり、隣接衛星方向でビーム幅を狭くすることにより、低サイドローブ特性が得られる。更に、衛星が軌道上で軌道に直交方向に微少移動しても衛星追尾する必要なく、従来の2軸でなく、1軸で衛星追尾が可能になり、衛星追尾機構が簡素化できる。

③に関しては、任意開口形状のなかで、車載用アンテナとして折り畳み時車両の屋根の形状にフィットさせるため、ほぼ楕円の開口形状を選び、所望の機械的条件と電気的条件を満足する楕円開口のオフセットグレゴリアンアンテナを研究した。

④に関して、前述の楕円開口のオフセットグレゴリアンアンテナにおいて高能率・低雑音、低サイドローブ、低交差偏波特性を研究した。

⑤に関しては、衛星搭載用反射鏡アンテナとして楕円ビームを有するオフセット形アンテナでの低サイドローブ化や複ビーム化を研究した。

本研究は、以上のような研究からなっており、衛星通信に用いるオフセット形反射鏡アンテナの設計法に関するものであり、その基本となるところは、

- (I) 従来の円形開口に限らず、楕円を含む任意開口のオフセット形複反射鏡アンテナに適用できる新しい鏡面修整法の研究
- (II) 上記(I)の鏡面修整法を低交差偏波オフセット形楕円ビームアンテナや低サイドローブオフセット形楕円ビームアンテナおよび成形ビームアンテナなど各種オフセット形反射鏡アンテナの設計へ応用する研究

である。

1.2 従来の反射鏡アンテナの鏡面修整に関する研究の概要

反射鏡アンテナの鏡面修整に関する研究の歴史は旧く、1940年代に始まる。基本的には、鏡面形状を解析的に求める方法として次の3つの方法に集約できる[27]。当初はDunbar[29]らによるレーダアンテナの鏡面修整で、1枚の反射鏡を用い所望の方向に所望の電力を照射する、いわゆる電力パターンに基づく鏡面修整法であった。

一次元モデルとして、線波源で給電した図1.6で示す筒状の反射鏡を用い、その線波源に垂直な断面で所望のビームを放射するアンテナを考える。1次放射器および所望の放射パターンをそれぞれ $E_p(\theta)$ 及び $E_d(\eta)$ とし、任意の光線FMPを考えると、次の2条件が成立する。

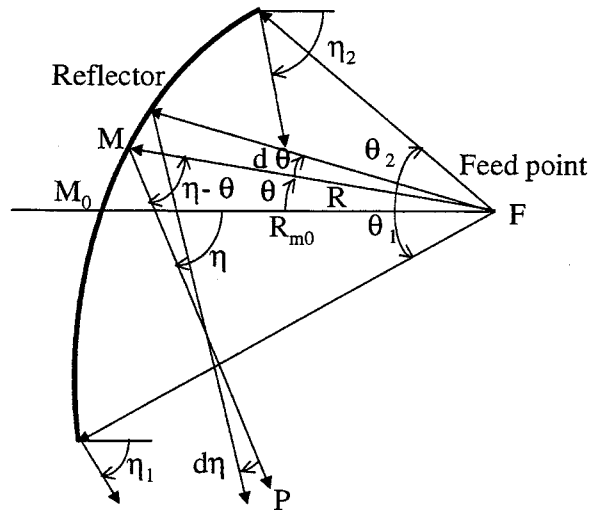


図 1.6 電力パターンによる 鏡面修整
Fig. 1.6 Reflector shaping method using power pattern from primary horn

- (1) 電力保存の条件 1次放射器の θ_1 から θ の範囲と θ_1 から θ_2 の範囲での電力比と反射鏡からの2次パターンの η_1 から η の範囲と η_1 から η_2 の範囲との電力比が等しいことから次式を得る.

$$\frac{\int_{\theta_1}^{\theta} |E_p(\theta)|^2 d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} |E_p(\theta)|^2 d\theta} = \frac{\int_{\eta_1}^{\eta} |E_d(\eta)|^2 d\eta}{\int_{\eta_1}^{\eta_2} |E_d(\eta)|^2 d\eta} \quad (1.1)$$

- (2) 反射の法則 原点Fから鏡面上での点Mまでの距離をRとし、点Mでの入射波と反射波の関係から次式を得る.

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\theta} = -\tan \frac{\eta - \theta}{2} \quad (1.2)$$

式(1.1)から θ と η との関係が得られ、式(1.2)を解くと鏡面座標(R, θ)は

$$R = R_{m0} \left\{ \int_0^{\theta} \left(-\tan \frac{\eta - \theta}{2} \right) d\theta \right\} \quad (1.3)$$

となる. ここで R_{m0} は $\theta = 0$ での R である. この考え方は2次元モデルの場合に拡張でき、点波源を用いたダブルカーブ形反射鏡アンテナ[29]の設計に応用できる. この場合、直交面内は放物面の断面をもつ反射鏡である.

その後 Kinber[2]により複反射鏡アンテナで開口面における振幅・位相ともに均一になるように反射鏡面を放物面・双曲面から変形させたアンテナで従来のアンテナより開口能率を一層増加させることが可能になるような鏡面が存在することが示された. この方法はいわゆる開口位相と電力分布に基づく鏡面修整法である. 図 1.7 の複反射鏡アンテナで、給電点 F から開口面上の点 P までの光線 FSMP

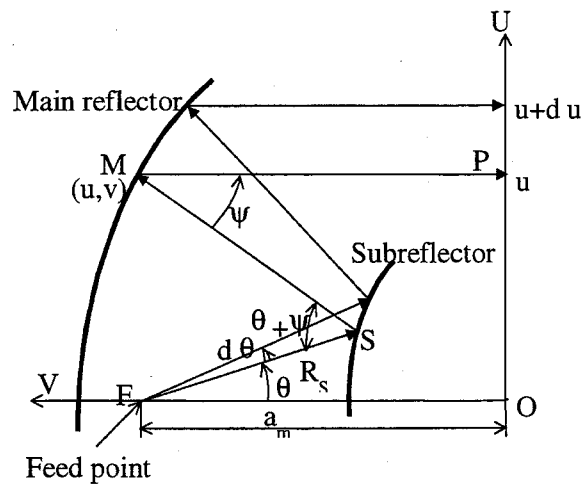


図 1.7 開口位相と電力分布による鏡面修整
Fig. 1.7 Reflector shaping method using aperture phase and power pattern

について①電力保存の法則②光路長一定の法則③反射の法則の 3 条件を満たすように主・副反射鏡をきめる．すなわち①については式 (1.1)に，②については次式が成立する．

$$R_s + \frac{v - a_m + R_s \cos \theta}{\cos \psi} + v = C_0 \text{ (一定)} \quad (1.4)$$

ここで $a_m = OF$ であり定数である．さらに③については次式が成立する必要がある．

$$\begin{aligned} \frac{dv}{du} &= -\tan \frac{\psi}{2} \\ \frac{1}{R_s} \frac{dR_s}{d\theta} &= \tan \frac{\theta + \psi}{2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

主・副反射鏡の鏡面座標は上記①②の条件のもとで，式(1.5)の微分方程式を数値計算で求めることになる．この開口位相と電力分布に基づく鏡面修整法は最も一般的な鏡面修整法であり，後述するようにこの方法は回転対称形アンテナに限らず非回転対称形アンテナの設計に用いられている．

更に，1975 年片木ら[30]により 1 枚の反射鏡を用い所望の方向を所望の波面で照射する鏡面修整法として，いわゆる開口波面に基づく鏡面修整法が示された．図 1.8 に示す原点 F に設けた点波源からの球面波を所望の波面に変換する鏡面について考える．開口波面上の点を W ，その点の原点 F からの位置ベクトルを \mathbf{d} ，その点での波面に直交する単位ベクトルを \mathbf{n}_w ，鏡面上の点 M の位置ベクトルを \mathbf{r}_m ，点 M から点 W までの距離を R_w とする

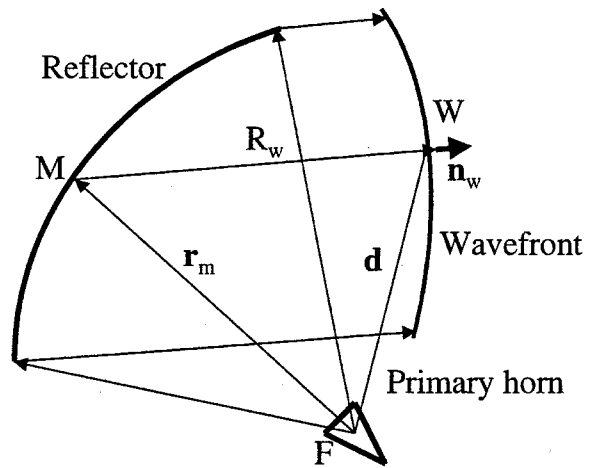


図 1.8 1枚の反射鏡アンテナ
Fig. 1.8 Reflector antenna fed by single horn

と、任意の光線 FMW について、原点 F から開口波面までの光路長一定の法則より次式を得る.

$$|\mathbf{r}_m| + R_w = C_1 \quad (1.6)$$

更に、開口波面について次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= \mathbf{r}_m + R_w \mathbf{n}_w \\ |\mathbf{r}_m|^2 &= |\mathbf{d}|^2 + R_w^2 - 2R_w (\mathbf{d} \cdot \mathbf{n}_w) \end{aligned} \quad (1.7)$$

従って、鏡面を表す \mathbf{r}_m は

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{d} - \frac{1}{2} \frac{C_1^2 - |\mathbf{d}|^2}{C_1 - (\mathbf{d} \cdot \mathbf{n}_w)} \mathbf{n}_w \quad (1.8)$$

となる.

この方法の特徴は直接的には鏡面上での反射の法則を示す式を使っていない点にあり、上記式(1.6) (1.7)を満たせば、反射の法則は成立している. 開口波面に基づく鏡面修整法は当初衛星搭載用アンテナの設計に用いられたが、本論文で示すように円形開口に限定せず任意開口を有する複反射鏡アンテナの設計に拡張できる.

これらの鏡面修整法以外に解析的ではなく、数値的に最適値をもとめることにより鏡面を決定する鏡面修整法がある. 例えば1枚の反射鏡アンテナにおいて、その開口位相分布を最小2乗法により最適化する方法がある.

オフセット複反射鏡アンテナにおける鏡面修整についてのこれまでの研究は次のとおりである. 従来の複反射鏡アンテナの鏡面修整法は前述の開口位相と開口面分布に基づく設計法であり、先に述べたように回転対称形複反射鏡アンテナの鏡面修整の研究が Kinber[2], Galindo[31], 喜連川ら[3]によってなされた. この鏡面修整法を踏襲し、オフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整法についても、多数の研究がなされた. 1974年水沢ら[21]は、ダブリーカーブの概念[27]

を導入し主・副反射鏡の縦断面のみについての解をもとめ、それをもとに全体を近似的に決める方法を研究した。また、オフセット形複反射鏡アンテナは非対称鏡面を使用するため、交差偏波特性に注意を払う必要があり、交差偏波特性を含めたオフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整法の研究が、1979 年 Galindo ら[22], 1979 年 Lee ら[32], 1982 年 Mittra ら[33], 1984 年刈込ら[34]によってなされた。これらの研究はいずれも前述の回転対称の複反射鏡アンテナの鏡面修整の幾何光学的条件である鏡面上の反射の法則、電力保存の法則および光路長一定の法則の 3 条件および開口面分布の回転対称性を加えた計 4 個の条件より導かれた連立偏微分方程式を数値積分することにより鏡面座標を求めている。なお、数値積分において、可積分条件[35]が成り立つかどうかを考慮している。この研究は任意の初期値に対し、所望の開口形状、開口面分布を有し、かつ交差偏波成分のない鏡面修整されたアンテナの設計を目指すものであったが、これらの条件をすべて同時に満足する解はなく、どれか 1 つの条件を近似的に満足させて鏡面修整とした。

その結果、開口面上での振幅分布が完全には所望のものとはならない[22], [32], 主反射鏡からの放射ベクトルに方向誤差を生じるために交差偏波特性が劣化する[33], 初期値を適当に選べば、この近似が無視できる程度に小さくでき、実質的には上記 5 条件を満足できる解が求められる[34]などが明らかになった。

1975 年に水口ら[35], 1981 年に Westcott ら[23], 1985 年に野本ら[24], [37], 1987 年に Galindo ら[25]によって、反射の法則、電力保存の法則および光路長一定の法則の 3 条件に可積分条件を加えた 4 条件より求められる連立偏微分方程式を数値積分することにより、幾何光学的に厳密に鏡面座標を求める鏡面修整法が研究された。この設計法は幾何光学的に厳密な解を与えうるものである。しかしながら、与える 1 次放射器からの放射パターンと開口面分布とがいずれも回転対称である場合への適用を考慮したものである。従って、楕円ビームアンテナへの適用が難しく、また、与える 1 次放射器からの放射パターンは実際の放射パターンと必ずしも一致しないため実際の開口面分布と差異を生ずる。さらに、鏡面座標は偏微分方程式を数値的に解くことにより得られるため、離散的な座標しか得られないなどの欠点がある。

更に、楕円ビームを有するオフセット複反射鏡アンテナの鏡面修整法に関しては、1983年 Pontoppidan ら[38]は、副反射鏡の焦点 F_2 を動かし近似的に楕円開口を得る方法を示している。この方法は位相分布に関しては所望の値を得られるが振幅分布は制御が困難である。また、1984年 Westcott ら[39]は前述の円形開口に適用した手法を楕円開口に拡張している。この方法は前述の円形開口の場合と同じく Monge-Ampère 形の偏微分方程式を数値的に解く方法である。ここではカセグレンアンテナおよびグレゴリアンアンテナにおいて離散的な鏡面座標の設計例が示されている。その他に、1992年 Viskum ら[40]は主反射鏡をツェルニケ関数で展開し、その係数を計算で得られた開口面分布と所望の開口面分布との差の2乗和が最小値になるまで展開を繰り返す方法を示した。なお、Pontoppidan, Viskum らの鏡面修整法は従来の開口波面と開口面分布に基づく方法ではなく、楕円ビームアンテナの設計のために考えられたものである。

一方、オフセット形複反射鏡アンテナの低交差偏波化や交差偏波消去法に関するこれまでの研究は次のとおりである。先に述べたように Graham[17]、田中ら[18]、水口ら[20]がその先鞭をなし、更に、1975年田中ら[19]によって、回転2次曲面鏡系からなる一般のオフセット形複反射鏡アンテナの交差偏波特性が研究された。この研究は等価ホーンレフレクタアンテナの概念により、2枚の反射鏡を1枚の放物面鏡から構成されるオフセットパラボラアンテナ[16]に置き換え、交差偏波成分を評価する方法であり、回転2次曲面鏡からなる2枚反射鏡など複数枚の反射鏡系の交差偏波消去条件が明らかにされた。

その後、鏡面修整されたオフセット形複反射鏡アンテナでの交差偏波特性に関しては、前述のように多数の研究者で研究された。特に、幾何光学的に厳密な解を得ることができる、4条件による鏡面決定法では、これらの4条件を同時に満足することは明らかにされているが、交差偏波については自由度がなく、その発生量は初期値に依存することになる。この初期値は用いる鏡面修整法によりその定義が異なる拘束条件であり、通常は初期値を変えると、交差偏波発生量が変わるとともに鏡面の形状も変わる。アンテナ設計においては、前述の電氣的条件と同様、ブロッキングを避けるための条件やアンテナ全体の大きさに対する条件などの機械構造上条件も重要な設計条件であるため、交差偏波成

分の発生を最小にする条件とこれらの機械的条件を同時に満足する初期値を与えることが重要となる。

先に示したいずれの鏡面修整法においても、鏡面形状や交差偏波特性は与えられた初期値に対し偏微分方程式を数値的に解いて初めて決定されるため、両条件を満足する解を見出すのに幾度か同じ手順での繰り返し計算が必要となる。

衛星搭載用反射鏡アンテナにおいて、所要のサービスエリアを効率よく照射する方法として、主ビームと副ビームによる複合ビームなどの成形ビーム化が考えられる。このような成形ビームを図 1.8 に示すような1枚の反射鏡アンテナの鏡面修整で実現する方法として、1つの1次放射器と鏡面修整した反射鏡を用いる方式がある。その方法として開口波面に基づく鏡面修整法と数値的に最適値をもとめることにより鏡面を決定する鏡面修整法がある。

1975年片木ら[30]は、ホーンレフレクタ形式のアンテナにおいて、所要のビーム形状に対応する開口面上の波面の形状を求め、点波源から放射される球面波をその波面に変換するよう鏡面の形状を光路長一定の法則により修整する、鏡面修整法を示した。この方法では開口面上の波面として凸多面体の一部から構成される波面を想定しているため、主ビーム以外の特定の方向に副ビームを有するようなビーム形状を実現することは困難である。

一方、1988年 Cherrette ら[41]は、開口位相分布に基づくもので、遠方界から開口面上での位相分布の最適化による鏡面修整法である。すなわち、与えられた開口振幅分布に対し、遠方界の利得拘束点におけるアンテナ利得の計算値と目標利得の差の2乗和が最小となるよう開口位相分布を最適化する方法を示した。この方法はビーム形状によっては鏡面に不連続性を生ずることがある。この欠点を解消するため、1992年正源ら[42]は、利得拘束点におけるアンテナ利得の計算値と目標利得の差に重み付けを行いながら、隣り合う開口セグメントにおける位相差に拘束条件を付加し、上記の最小2乗法により位相分布の最適化を図っている。なお、この方法は周波数帯域専用のアンテナの設計を想定している。また、1989年庄木ら[43]は2周波数帯の成形ビームアンテナの設計のために、Cherrette らの方法を拡張している。1989年 Ramanujanm ら[39]は、対波長比が比較的大きい開口径のアンテナでは、振幅分布を固定し、位相分布のみ

を変えることでビーム形状が変えられることに着目し、遠方界から求めた所要の開口分布のうち、所要の位相分布を実現するように、光路長一定の法則により、主もしくは副反射鏡を鏡面修整する方法を示している。1991年には Poulton ら[45]は、アレーアンテナの最適化手法を開口面アンテナに拡張している。

すなわち、開口を分割し、遠方界を求め、所要の合成放射パターンになるよう、開口位相を最適化する方法を示し、その最適化アルゴリズムとして、継続的投影法 (Successive projection) を用いている。なお、庄木, Ramanujanm, Poulton らのいずれに於いても、副ビームを有するビーム形状の設計例はない。

この他、1987年 Brown[46]らにより、鏡面を2次函数とフーリエ級数で展開し、その係数を最適化する方法が示された。すなわち、所定の位置での遠方界のアンテナ利得の計算値と目標利得との差の2乗和が最小になるように、最適検索ルーチン (Optimisation search routine) と呼ぶ数値計算で、その係数を決める鏡面修整法である。

以上のように、これまで比較的単純なビーム形状から複雑なビーム形状の設計例が網羅されている。しかしながら、前述の Cherrette, 正源, 庄木, Ramanujanm, Poulton らのいずれの方法も、その設計法はいずれも遠方界から求めた開口位相分布の最適化による鏡面修整法であり、この場合、鏡面形状は一旦最適位相分布を計算した後、所定の周波数対応で光路長一定の法則から求められる。また、Brown は遠方界から求めた鏡面係数を最適化する鏡面修整法である。この場合、鏡面形状は直接鏡面係数から求められる。

1.3 本研究の概要

1.3.1 新しい鏡面修整法の研究

オフセット形複反射鏡アンテナの鏡面設計法として、従来の設計法とは異なる概念の新しい鏡面修整方法を考案した。従来の設計法が開口位相と開口面分布とに基づく設計法であるのに対し、これは1.2節の開口波面に基づく設計法を拡張したもので、開口面での波面の形状と光路長一定の法則を基本として、鏡面形状を決めるものである。以下、具体的な鏡面修整法を述べる。

図 1.9 に示すように主および副反射鏡の2枚の反射鏡からなるオフセット形複反射鏡アンテナにおいて、初期値としての回転2次曲面鏡系を与え、鏡面修整関数により副反射鏡を変化させ、光路長一定の法則と副反射鏡上での反射の法則を用いて、開口面上で平面波を実現するように主反射鏡の鏡面を求める。図 1.9 において、1次放射器の位相中心である点 F から副反射鏡上の点 S に至るベクトルを $R_s \mathbf{e}_r$ 、点 S から主反射鏡上の点 M に至るベクトルを $R_m \mathbf{e}_s$ 、点 F から点 M に至るベクトルを \mathbf{r}_m 、 \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_s をそれぞれ単位ベクトルとする。また主反射鏡からの遠方に向かう光線の方法の単位ベクトルを \mathbf{k} する。

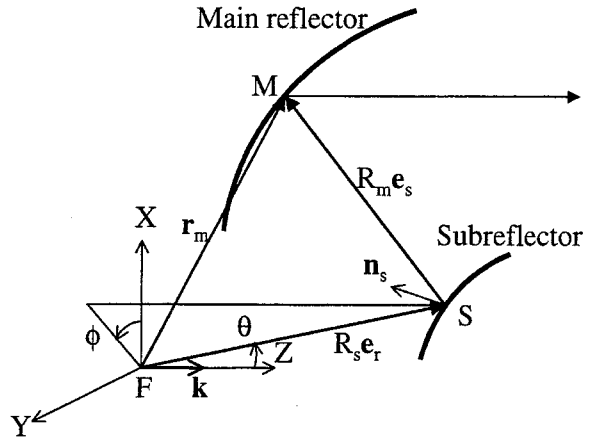


図 1.9 オフセット形複反射鏡アンテナ
Fig. 1.9 Offset dual-reflector antenna

R_s , \mathbf{e}_r , \mathbf{k} が与えられているとする。そうすれば次式が成立する。

$$\mathbf{r}_m = R_s \mathbf{e}_r + R_m \mathbf{e}_s \quad (1.9)$$

光路長一定の法則から

$$R_s + R_m - \mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k} = C_2 \text{ (定数)} \quad (1.10)$$

ベクトル \mathbf{e}_s は副反射鏡上の点 S での単位法線ベクトル \mathbf{n}_s を用いて次式で示され、

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_r - 2(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{n}_s) \mathbf{n}_s \quad (1.11)$$

$$\mathbf{n}_s = \frac{\left(\frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \theta} \right) \times \left(\frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \phi} \right)}{\left| \frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \theta} \times \frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \phi} \right|}$$

となる。ここで $R_s \mathbf{e}_r$ は1次放射器の軸に沿う曲座標系 (θ, ϕ) の関数で与えられている。

式(1.9), (1.10)より R_m は次式となる。

$$R_m = \frac{C_2 - R_s(1 - \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k})}{1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}} \quad (1.12)$$

従って、 R_s , \mathbf{e}_r , \mathbf{k} が与えられれば、式(1.9)より主反射鏡上の点 M の座標 \mathbf{r}_m が決まる。

更に、各反射鏡位置での波面上での電力保存則より、主反射鏡上での電界分布を求め、電流分布法により遠方放射パターンを計算する。その結果に基づいて鏡面修整関数のパラメータを変化させ、所望の放射特性を有するよう、主・副反射鏡鏡面を修整する[47]。

この方法は、次のような特長を有している。

- ① 開口形状および開口面分布は鏡面修整関数を適当に選択することにより任意のものができするため、設計法に汎用性がある。
- ② 1次放射器からの放射パターンは実際の1次放射器のものを用いるため設計したアンテナは幾何光学的には厳密である。
- ③ 鏡面形状は関数で与えられるため任意の点の座標が厳密である。
- ④ 連立偏微分方程式を解く必要はなく、比較的簡単なアルゴリズムでアンテナ設計が可能である。

本研究を高能率形に鏡面修整したオフセット形楕円ビームアンテナの設計に適用した[47]。第2章にその内容を示す。設計したアンテナは、開口径が長径 4.7m, 短径 2.3m のほぼ楕円開口の 30/20GHz 帯のオフセットカセグレンアンテナで、その試作により設計の妥当性が確認できた。実測したアンテナの開口能率は 81% (20GHz), 楕円ビームの長径と短径の比率は 2:1 である。また、広角サイドローブ特性は $32 - 25 \log \Theta$, dBi 以下の特性を十分満たしている。

1.3.2 各種オフセット形複反射鏡アンテナの設計への 本鏡面修整法の応用

高能率を保ちながら，低交差偏波特性を有するオフセット形楕円ビームアンテナを設計するために，第2章に述べた鏡面修整法を改良する．先に述べたように，アンテナ設計においては電気的条件と同様，機械的条件も重要な設計条件であり，従来の方ではいずれも電気的条件を満足する解を求め，機械的条件を満たすまで計算を繰り返す必要があった．

この研究では，これらを同時に満足する初期値を見出す．まず，初期値を回転2次曲面鏡で与え，所望の開口形状(外周)を得るための鏡面修整においては中心断面の鏡面形状は初期値から変化しないように鏡面修整関数を定義し，一方，所望の開口面分布を得るための鏡面修整においては中心断面の副反射鏡のエッジの法線方向は初期値から変化しない鏡面修整関数を定義する．

このように初期値を定義すれば，初期値の中心断面形状と鏡面修整後の断面形状がほとんど同じになるため，機械的条件を満足する初期値を選定すれば，鏡面修整後の鏡面系も機械的条件を満足することになる．従って，低交差偏波特性をもつアンテナとするには鏡面修整後に交差偏波消去条件を満足するような初期値を選定すればよいことになる．

そのため，ここでは，図 1.10 に示すオフセット形複反射鏡アンテナの交差偏波成分の発生量はその水平面内における鏡面中心部の形状によっ

てほとんど決まることに着目し，鏡面修整後における水平面内の鏡面中心部の形状を表す“代表的な回転2次曲面鏡系”を求め，この回転2次曲面鏡系が交差偏波消去条件系となるよう，初期値

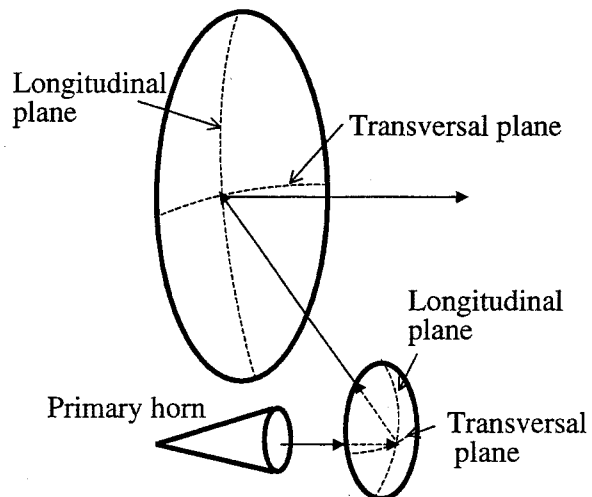


図 1.10 オフセット形アンテナの垂直面および水平面

Fig. 1.10 Transversal and vertical planes of offset type reflector antenna

となる回転2次曲面鏡系を決める．なお，“代表的な回転2次曲面鏡系”の求めかたとしては，オフセット鏡面の回転対称鏡面への置き換えによる手法を考案した[48]．

本研究を，機械的条件を満足し，高効率でかつ低交差偏波特性を有するオフセット形楕円ビームアンテナの設計に適用した．設計したアンテナは開口径が長径 2m，短径 1mの楕円開口のオフセット形グレゴリアンアンテナであり，14/12GHz 帯の，いわゆる VSAT(Very Small Aperture Terminal)や SNG(Satellite News Gathering) システムに使用されるアンテナである．第3章では，機械的条件を満足し，高効率でかつ低交差偏波特性を有する，オフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整法と，その設計法により試作した上記アンテナの実測結果を示し，その実測結果から設計法の妥当性を明らかにする．このアンテナは 70%以上の開口能率を有しつつ，交差偏波成分のピーク値として-32dB (要求値はビーム中心方向で-27dB)以下を実現するとともに，広角サイドローブ特性については CCIR 勧告値 $29-25 \log \Theta$, dBi 以下の特性を十分満足する低サイドローブ特性を有している[49]．更に，円形開口のオフセットカセグレンアンテナでの設計例も示す．

前章では，主および副反射鏡から構成されるオフセット形2枚鏡アンテナでの鏡面修整法について述べた．このように主反射鏡，副反射鏡に鏡面修整を適用すると，アンテナの開口径が大きくなったとき，主反射鏡を構成するアンテナパネルが多種類の修整鏡面となるため，アンテナの製造コストが上昇し経済的に不利になる．従って，主反射鏡を放物面鏡の一部とする無修整のパラボラとすることにより，製造コストが低減できることが考えられる．第4章では，図 1.11 に示すアンテナを3枚鏡とし，そのうち主反射鏡を無修整のパラボラ，他の2枚の反射鏡を鏡面修整関数により鏡面修整し，低交差偏波特性を実現する設計法を示す[50]．本章では，低交差偏波特性を有する

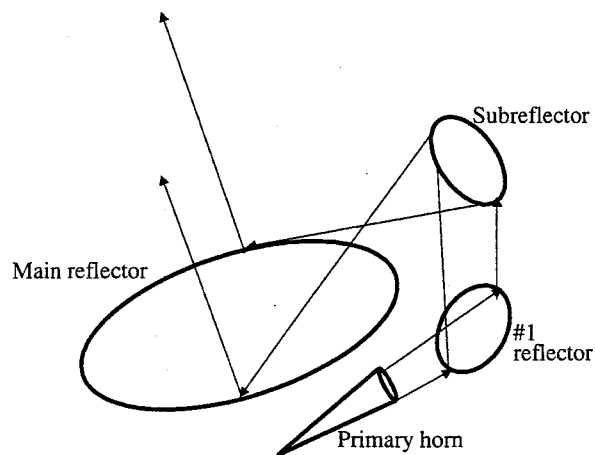


図 1.11 3枚鏡アンテナ

Fig. 1.11 Tri-reflector antenna

オフセット形 3 枚鏡アンテナの鏡面修整法と、その設計法により試作した開口径 5.5m のアンテナの実測結果を示し、その実測結果から設計法の妥当性を明らかにする。

このアンテナは 14/12GHz 帯のオフセットグレゴリアン形式のインテルサット対応地球局アンテナであり、開口能率 75%、交差偏波成分のピーク値 -33dB (要求値はアンテナ正面方向で -30dB 以下)、広角サイドローブ特性として CCIR 勧告値 $29-25 \log \Theta$, dBi 以下の性能を得ている [51]。

以上のごとく、本研究による鏡面修整法により、オフセット複反射鏡アンテナにおいて、ビーム形状を所望の形状に成形させながら、高能率・低交差偏波特性を実現でき、かつ広角サイドローブ特性の低サイドローブ化をも実現できる。しかしながら、この鏡面修整法を所定のエリア(指定のビームコンター)でサイドローブレベルを -30dB 以下にするという非常に低いサイドローブ特性を要求する衛星搭載用アンテナに適用し、設計・製作したところ、所望のサイドローブ特性が実現できないことが判明した。

このように、一旦アンテナを製作した後で、サイドローブ特性が所望値を満たしていないことが判明した場合のサイドローブ特性の改善方法に関し、ほとんど研究されていない。このように所望のサイドローブ特性がきわめて低いサイドローブレベルが要求されるアンテナの設計において、アンテナ設計法の誤差、例えば幾何光学設計による誤差やアンテナの製作誤差などにより、アンテナを製作後、所望のサイドローブ特性が得られないことが判明する場合がある。このような場合に有効な解決法として、図 1.12 に示す主もしくは副反

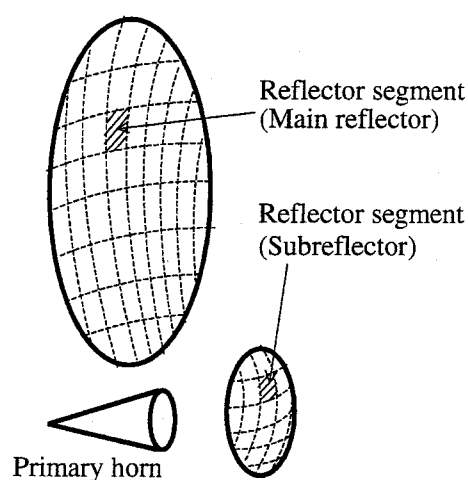


図 1.12 オフセット形アンテナの部分鏡面

Fig. 1.12 Reflector segment of offset type reflector antenna

射鏡を多数の部分鏡面に分割し、それぞれの相対位置を変えることにより開口面上の位相分布を制御し、所望の性能を得る鏡面分割構成法を考案した。この研究について第 5 章に述べる [52]。この手法は、第 2 章の鏡面修整法の変形といえ、実験的に鏡面修整量を求めていくという点に特徴がある。本章では低サイ

ドロブ特性の実現法の詳細と、その方法を開口径が長径 1.8m, 短径 1.3m のオフセット形楕円ビームアンテナに適用し、所望の性能を得た結果を示す。

第5章までは、単一ビームの楕円、もしくは円形ビームを放射するアンテナの設計の場合であるが、第6章では図 1.13 に示す主ビームと、それに比べ低いレベルの副ビームの親子ビームなど複ビームを放射するオフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法として考案した平面波合成法[47]を述べる。この方法もこれまでの研究と同様開口波面に基づく鏡面修整法である。片木らは[30], 開口面での波面を中心部では球面波, その周辺部では線織面の波面と

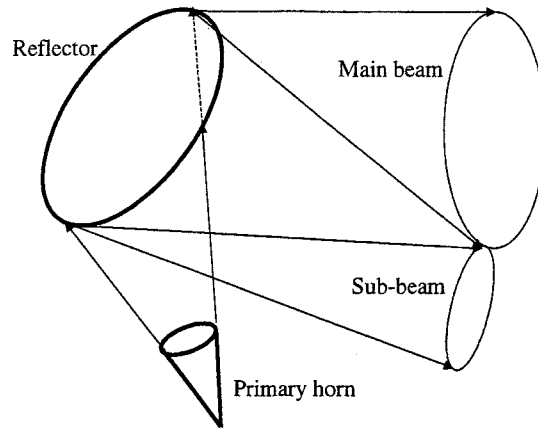


図 1.13 複ビームを形成するオフセット形反射鏡アンテナ

Fig. 1.13 Offset reflector antenna with sub-beam

し、単一ビームを放射するアンテナの鏡面修整法を示した。ここでは、その設計法を発展させ、複数のビームを放射するアンテナの鏡面修整法を示す。平面波合成法は、1つの1次放射器と1枚の反射鏡とで構成される成形ビームホーンレフレクタアンテナにおいて、主ビームと主ビームから離れた特定方向に所要の副ビームを有するような複合ビームを生成するには、まず主ビームに対応する波面を求め、次にその波面と副ビームの方向に向かう平面波面とを適当な振幅比で開口面上で合成し、その波面を実現するよう光路長一定の法則から鏡面を修整する方法である。この場合、鏡面の形状は直接鏡面修整計算から求められる。本設計法の基本的性質を調べるため、開口径 950mm, 焦点と鏡面の周囲を結ぶ円錐の頂角(開き角)が 40° で与えられる成形ビームホーンレフレクタアンテナ(定ビームアンテナ)[54]において、周波数を 19.45GHz と 29.25GHz とし、副ビームを $Az=1.1^\circ$, $El=1.4^\circ$ 方向に主ビームのピークレベルに対し-7dB の副ビームを得る検討を行なった。更に、この平面波合成法を、日本国内をサービスエリアに想定した 30/20GHz 帯の成形ビームアンテナの設計に適用する。実際の設計は最適化のため直接探索法的一种である実験計画法により設計パラメータを決定している。

第2章

鏡面修整関数による鏡面修整法

2.1 まえがき

衛星通信地球局アンテナや衛星搭載用アンテナに用いられる反射鏡アンテナに対する要求として、楕円ビーム化がある。例えば、衛星通信地球局アンテナにおいては、VSAT 用アンテナ等のようにアンテナが小口径化するにつれて衛星との干渉が問題となり、これを避けるために、図 2.1 のように衛星軌道面内のビーム幅を狭くする、衛星軌道面の方向に長軸をもつ楕円開口とする方法がある[55]。この場合同一利得，すなわち，同一開口面積を有する円形ビームアンテナと比較すると，衛星軌道面内に直交する面内のビーム幅は広くなるため，図 2.2 に示すようにその面内において衛星の追尾機構が不要となる利点もある。また，衛星搭載用アンテナにおいても，ビーム照射エリアを円形ビームでカバーするよりも楕円ビームでカバーする方が効率が良い場合がある。

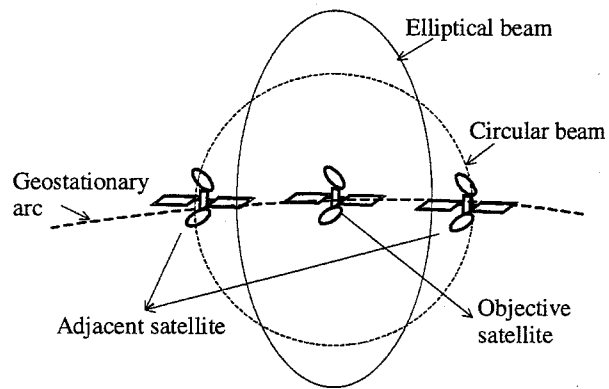


図 2.1 隣接する衛星への干渉

Fig. 2.1 Interference from/to adjacent satellite

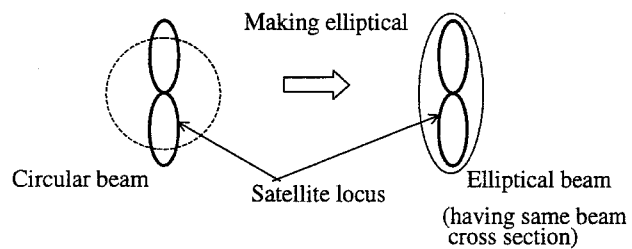


図 2.2 アンテナの楕円ビーム化

Fig. 2.2 Making antenna beam elliptical

楕円ビームを実現するアンテナとしては、図 2.3 に示すように、(a) 楕円開口オフセットパラボラを楕円コルゲートホーン等の楕円ビームを放射する 1 次放射器で給電する方法[55][56]や(b)円形開口オフセットパラボラを小口径ホーンアレーで給電する方法[57]等の 1 枚反射鏡形式と、(c)副反射鏡の外形を保ちつつ、主反射鏡を楕円開口とするよう鏡面修整した主、副反射鏡系を円形コルゲートホーンや複モードホーン等の円形ビームを

放射する 1 次放射器で給電する複反射鏡形式[47 等]とがある。このうち、後者は鏡面修整による高能率化・低サイドロープ化や 2 枚の反射鏡から発生する交差偏差成分を互いに打ち消すことによる低交差偏波レベル化ができる等の利点がある。

オフセット形複反射鏡アンテナを幾何光学的に鏡面修整する方法としては、回転対称の複反射鏡の場合の考え方を踏襲し、従来は Westcott, 野本, Galindo-Israel により研究されたように、与えられた 1 次放射パターンと所望の開口面分布とを結びつける微分方程式を計算機で数値的に解く方法、すなわち、開口位相と電力分布による鏡面修整法が一般的であった[23], [24], [25]。これは、3つの幾何光学条件である反射の法則、エネルギー保存則および光路長一定の条件と、可積分条件とを用いて得られる連立偏微分方程式を解くことにより、数値解析的に鏡面座標を求めるものである。この設計法は、幾何光学的意味においては、一義的に厳密解を与え得るものであるが、与える 1 次放射パターンと開口面分布とがいずれも回転対称である場合への適用を考慮したものである。従って、楕円ビームアンテナへの適用は難しく、また、与える 1 次放射パターンは実際の 1 次放射器のものと必ずしも一致しないために実際の開口面分布と異差を生じる。更に、鏡面座標は微分方程式を数値的に解くことにより得られ

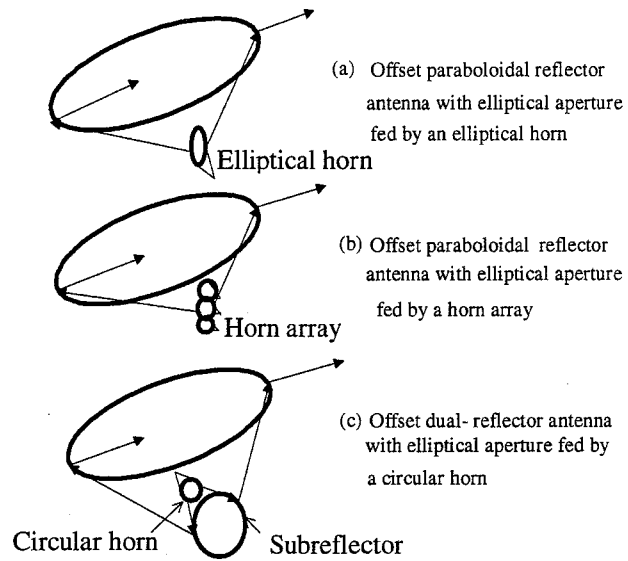


図 2.3 楕円ビームを実現するアンテナの例
Fig. 2.3 Example of antenna with elliptical beam

るため、離散的な鏡面座標しか得られない、解の精度が必ずしも十分でない等の欠点がある。

更に、楕円ビームを有するオフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整法については、1982年 Pontoppidan ら[38]は副反射鏡の焦点 F_2 を移動させ、近似的に楕円開口を求めている。この方法は開口での一様な位相分布を得るが、所望の振幅分布を得るように制御できない。また、1984年 Westcott ら[39]が上記の円形開口の方法を楕円開口に適用できるように拡張している。鏡面座標は Monge-Ampère 形の偏微分方程式を数値解析して求められる。Westcott らはカセグレンアンテナおよびグレゴリアンアンテナでの離散的な鏡面座標の設計例を示している。更に、1992年 Viskum[40]は主反射鏡の鏡面座標をツエルニケ関数で展開し、その係数を所望の開口面分布と計算された開口面分布での間の差異の2乗和が最少になるまで変化させて、最終的な展開係数を得て鏡面を決めている。この方法を INTESAT-VII Ku 帯アンテナに適用し、低サイドローブ特性で低交差偏波特性を有する楕円ビームアンテナを得ている。

本章では、新たに考案した、上記の鏡面修整法と原理的に異なる、開口波面に基づく鏡面オフセット形複反射鏡アンテナの鏡面設計法について述べる。この方法は、図 2.4 に示すように主および副反射鏡の2枚の反射鏡からなるオフセット形複反射鏡アンテナにおいて、初期値としての回転2次曲面鏡(以下2次曲面鏡とする)を与え、鏡面修整関数により副反射鏡を変化させ、開口面上で平面波を実現するように主反射鏡の鏡面を求め、電流分布法により放射パターン

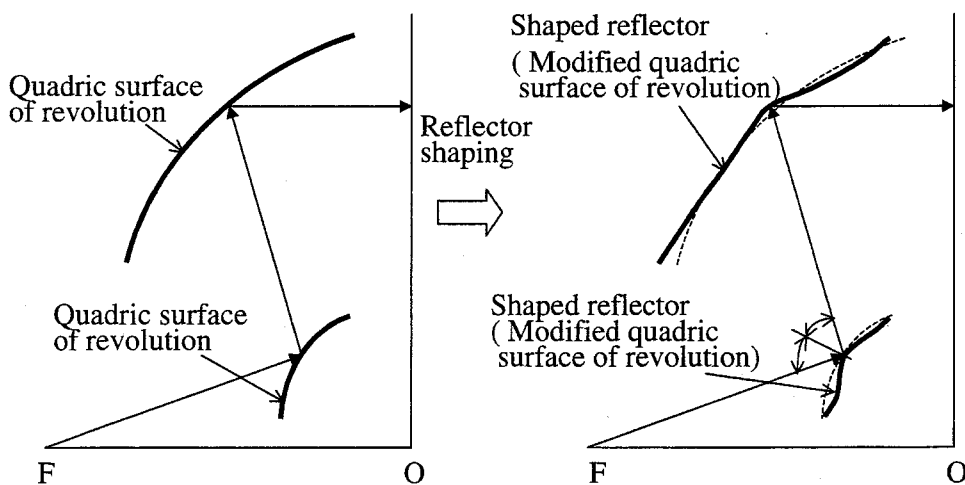


図 2.4 修整関数による鏡面修整

Fig. 2.4 Reflector shaping by means of reflector shaping functions

を計算し、その結果に基づいて鏡面修整関数のパラメータを変化させ、最終的に所望の放射特性を有するアンテナ鏡面系を求める方法である[47]。ここで、鏡面修整関数として、開口形状を変える関数と開口面分布を変える関数を定義する。

この方法では、前述の4条件から得る連立偏微分方程式を解く代わりに、開口波面の形状を決めた上で、副反射鏡上での反射の法則と、光路長一定の法則を拘束条件として鏡面を徐々に変形させ所望の鏡面を得ている。この方法によれば、①所望の開口形状および開口面分布が得られるまで鏡面修整を繰り返す必要がある、②得られる開口形状および開口面分布は所望のものと完全には一致しない等の欠点がある一方、以下の利点がある。

- ① 開口形状および開口面分布は鏡面修整関数を適当に選択することにより任意のものができするため、円形開口に限らず楕円など任意形状の開口形状が設計できるなど設計法に汎用性がある。
- ② 1次放射パターンは実際の1次放射器のものをを用いるため設計したアンテナは幾何光学的には厳密である。
- ③ 鏡面形状は関数で与えられるため任意の点の座標が厳密である。
- ④ 連立偏微分方程式を解く必要はなく、比較時簡単なアルゴリズムでアンテナ設計が可能である。

本鏡面修整法を、開口径が長径4.7m、短径2.3mのほぼ楕円開口の高能率鏡面修整のオフセット形楕円ビームアンテナの設計に適用し、その試作により設計の妥当性が確認できた。2.2節で鏡面設計法を示し、2.3節で目的に適した鏡面修整関数の例を示し、2.4節で試作アンテナの設計とその実測結果を示す。

なお、このような鏡面修整オフセット形複反射鏡アンテナにおいても、2次曲面鏡よりなるオフセット形複反射鏡と同様に、2枚の反射鏡から発生する交差偏波成分を幾何光学的に打ち消すことにより低交差偏波レベル化が可能である。これは、初期値として与える基本の2次曲面鏡の選定の問題であり、第3章においてその問題を取り扱う。

2.2 鏡面設計法

2.2.1 鏡面座標

主・副反射鏡を表わす座標系を図 2.5 に示す. 直交座標系 XYZ は, Z 軸がビームの放射方向と一致し, ZX 面がアンテナの中心断面と一致するよう決めている. i, j, k は, それぞれの軸の方向を表す単位ベクトルである. また, 直交座標系 X_1, Y_1, Z_1 は, 1 次放射器の位相中心である点 F から副反射鏡を見込む円錐の中心軸方向を Z_1 軸とし, $Z_1 X_1$ 面がアンテナの中心断面と一致するよう決めている. 更に, それぞれの軸の方向を表わす単位ベクトルを i_1, j_1, k_1 とし, この座標系に対して F を原点とする極座標 (r, θ, ϕ) を定義している.

図 2.6 において, 点 F から点 S に至るベクトルを $R_s e_r$, 点 S から主反射鏡上の点 M に至るベクトルを $R_m e_s$, 点 F から点 M に至るベクトルを r_m, e_r , e_s を単位ベクトルとすると, 点 F から副反射鏡上の任意の点 S までの距離 R_s は θ と ϕ の関数で与えられ,

$$R_s = R_s(\theta, \phi) \quad (2.1)$$

となる. 更には e_r は

$$e_r = \sin\theta (\cos\phi i_1 + \sin\phi j_1) + \cos\theta k_1 \quad (2.2)$$

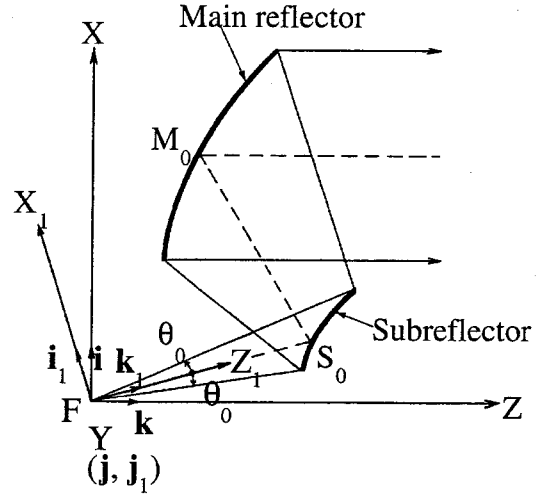


図 2.5 鏡面系と座標系
Fig. 2.5 Reflectors and their coordinate systems

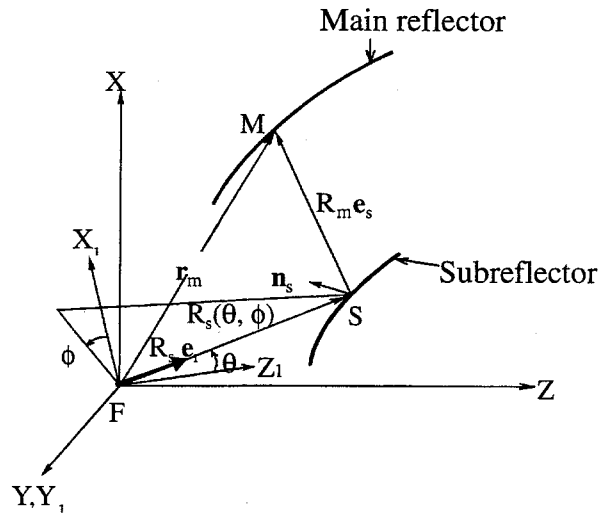


図 2.6 主反射鏡と副反射鏡
Fig. 2.6 Main reflector and subreflector system

となる.

ベクトル \mathbf{e}_s は副反射鏡上の点 S での単位法線ベクトル \mathbf{n}_s を用いて次式で示される.

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_r - 2(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{n}_s)\mathbf{n}_s \quad (2.3)$$

$$\mathbf{n}_s = \frac{\left(\frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \theta} \right) \times \left(\frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \phi} \right)}{\left| \frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \theta} \times \frac{\partial R_s \mathbf{e}_r}{\partial \phi} \right|} \quad (2.4)$$

光路長一定の法則から

$$R_s + R_m - \mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k} = C_3 \text{ (定数)} \quad (2.5)$$

ここで,

$$\mathbf{r}_m = R_s \mathbf{e}_r + R_m \mathbf{e}_s \quad (2.6)$$

式(2-5), (2-6)より R_m は次式で与えられる.

$$R_m = \frac{C_3 - R_s(1 - \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k})}{1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}} \quad (2.7)$$

結局, (2.1)式の $R_s(\theta, \phi)$ が与えられれば, 式(2.3)より \mathbf{e}_s が, 式(2.7)より R_m が順次決まり, 式(2.6)より主反射鏡上の点 M の座標 \mathbf{r}_m が決まることになる. 従って, アンテナの放射特性は, 副反射鏡の形状を決める $R_s(\theta, \phi)$ に依存することになる.

本設計法においては, $R_s(\theta, \phi)$ は基準の形状として 2 次曲面鏡を選び, 更に目的にあうようこれを変形するものとする. すなわち, 2 次曲面鏡を与える関数と鏡面修整関数の線形結合により, 次式のように副反射鏡の形状 $R_s(\theta, \phi)$ を表す.

$$R_s(\theta, \phi) = r_0(\theta, \phi) + \sum_i f_i(\theta, \phi) \quad (2.8)$$

$$r_0(\theta, \phi) = \frac{\delta p a_r (\bar{e}^2 - 1)}{1 + e(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l})} \quad (2.9)$$

$$\bar{e} = \delta p e$$

ここで、 $r_0(\theta, \phi)$ は基準の2次曲面鏡、 $f_i(\theta, \phi)$ は鏡面修整関数であり、 \mathbf{l} は2次曲面鏡の一方の焦点Fから他方の焦点F'に向かう単位ベクトル、 a_r は定数、 e_s は副反射鏡の離心率、 δ は1のとき凹面鏡、 -1 のとき凸面鏡、 p は1のとき回転双曲面鏡、 -1 のとき回転楕円面鏡を示すパラメータである[16].

2.2.2 鏡面上の電流分布と放射電界

図 2.7 に示すように、 \mathbf{r}_{w1} , \mathbf{r}_{w2} をそれぞれ波面 W_1 , W_2 上の点 S , M の位置ベクトルとする. ここで、1 次放射器から放射された電波の S を含む波面を W_1 , 主反射鏡に入射する点 M を含む波面を W_2 とする. これらの位置ベクトルはそれぞれ、

$$\mathbf{r}_{w1} = r_w \mathbf{e}_r \quad (\text{ただし, } r_w \text{ は定数}) \quad (2.10)$$

$$\mathbf{r}_{w2} = R_s \mathbf{e}_r + r_{sw} \mathbf{e}_s \quad (2.11)$$

(ただし、 $R_s + r_{sw}$ は定数)

で表される.

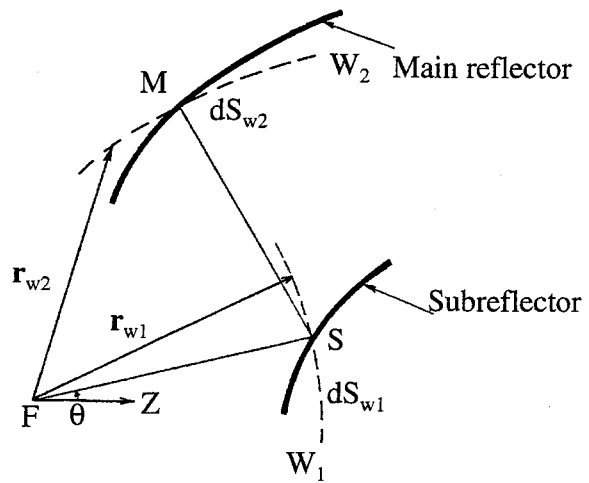


図 2.7 波面の面素 dS_{w1} , dS_{w2} およびベクトル \mathbf{r}_{w1} , \mathbf{r}_{w2} の関係

Fig. 2.7 Relationship between surface elements dS_{w1} and dS_{w2} and \mathbf{r}_{w1} and \mathbf{r}_{w2} vectors

この波面 W_1 上にとった面素を dS_{w1} , 波面 W_2 上にとった面素を dS_{w2} とすると, 各面素はそれぞれ

$$dS_{w1} = \left| \frac{\partial \mathbf{r}_{w1}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{r}_{w1}}{\partial \phi} \right| d\theta d\phi \quad (2.12)$$

$$= r_w^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

$$dS_{w2} = \left| \frac{\partial \mathbf{r}_{w2}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{r}_{w2}}{\partial \phi} \right| d\theta d\phi \quad (2.13)$$

$$= g d\theta d\phi$$

で表される. ここで, dS_{w1} と dS_{w2} とは光線にて対応づけられた面積である. g の値は式(2.11)を式(2.13)に代入することにより求められる. 更に, 各波面上の電界を \mathbf{E}_{w1} , \mathbf{E}_{w2} とし, 次のように表す.

$$\mathbf{E}_{w1} = \frac{\exp(-jkR_s) (\mathbf{E}_\theta \mathbf{e}_\theta + \mathbf{E}_\phi \mathbf{e}_\phi)}{R_s} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{E}_{w2} = (\bar{\mathbf{E}}_\theta \bar{\mathbf{e}}_\theta + \bar{\mathbf{E}}_\phi \bar{\mathbf{e}}_\phi) \exp\{-jk(R_s + R_m)\} \quad (2.15)$$

ここで, $\mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\phi$ は \mathbf{e}_r と直交する単位ベクトルであり, それぞれ極座標系の (θ, ϕ) に付随するベクトルである. また, $\bar{\mathbf{e}}_\theta, \bar{\mathbf{e}}_\phi$ は \mathbf{e}_s と直交する単位ベクトルであり, それぞれ極座標系の (θ, ϕ) に付随するベクトルである. 副反射鏡上での反射が幾何光学的に行われるものとすれば, $\mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\phi$ に沿った電界ベクトルは反射後に沿う電界ベクトル $\bar{\mathbf{e}}_\theta, \bar{\mathbf{e}}_\phi$ になる. すなわち,

$$\bar{\mathbf{e}}_\theta = -\mathbf{e}_\theta + 2(\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{n}_s) \mathbf{n}_s \quad (2.16)$$

$$\bar{\mathbf{e}}_\phi = -\mathbf{e}_\phi + 2(\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{n}_s) \mathbf{n}_s \quad (2.17)$$

ここで, $\bar{\mathbf{e}}_\theta, \bar{\mathbf{e}}_\phi$ は直交し, かつ \mathbf{e}_s に直交している.

更に, \mathbf{E}_{w1} , \mathbf{E}_{w2} に関してエネルギー保存則より次の関係が成立する.

$$|\mathbf{E}_{w1}|^2 dS_{w1} = |\mathbf{E}_{w2}|^2 dS_{w2} \quad (2.18)$$

これより,

$$\bar{E}_\theta = E_\theta \sqrt{\frac{\sin \theta}{g}} \quad (2.19)$$

$$\bar{E}_\phi = E_\phi \sqrt{\frac{\sin \theta}{g}} \quad (2.20)$$

従って, 1次放射器からの放射電界 \mathbf{E}_{w1} がわかれば, 式(2.15)より主反射鏡への入射電界 \mathbf{E}_{w2} が求められる. 更に, 電流分布法によって, 主反射鏡から図2.8に示す観測点Pにおける放射電界 $\mathbf{E}_s(P)$ を求めると次のようになる.

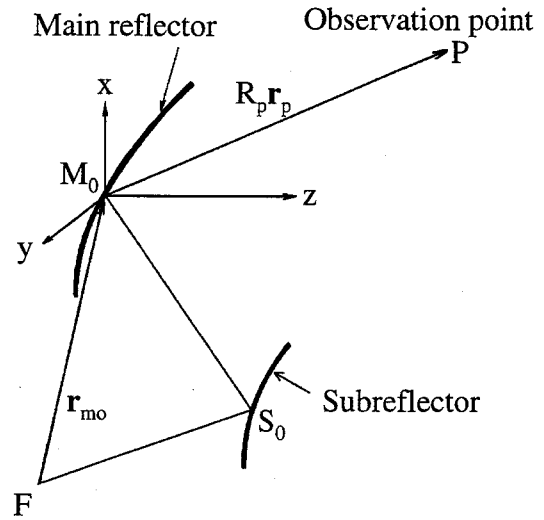


図 2.8 観測点の座標

Fig. 2.8 Coordinate system of an observation point

$$\mathbf{E}_s(P) = -\frac{j \exp(-jkR_p)}{\lambda R_p} \{ \mathbf{N} - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}_p) \mathbf{r}_p \} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{N} = \int (\mathbf{n}_m \times \eta_0 \mathbf{H}_{w2}) \exp(j\Omega_0) dS_m$$

$$\mathbf{n}_m dS_m = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \theta} \right) \times \left(\frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \phi} \right) d\theta d\phi$$

$$\Omega_0 = k \left[\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_p - \frac{1}{2R_p} \{ (\boldsymbol{\rho})^2 - (\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_p)^2 \} \right]$$

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}_m - \mathbf{r}_{m0}$$

ここで、 R_p は主反射鏡鏡面上の定点 M_0 から観測点 P までの距離、 \mathbf{r}_p はその M_0 から P に向かう単位ベクトル、 \mathbf{n}_m は主反射鏡鏡面上の任意の点 M での法線ベクトル、 \mathbf{r}_{m0} は鏡面上の定点 M_0 を示す位置ベクトル、 η_0 は自由空間の特性インピーダンス、 k は波数 ($\lambda/2\pi$)、 λ は波長である。また、 \mathbf{H}_{w2} は主反射鏡への入射磁界であり、式(2.15)の入射電界 \mathbf{E}_{w2} より、次式で求められる。

$$\mathbf{H}_{w2} = \frac{1}{\eta_0} (-\bar{\mathbf{E}}_\phi \bar{\mathbf{e}}_\theta + \bar{\mathbf{E}}_\theta \bar{\mathbf{e}}_\phi) \exp\{-jk(R_s + R_m)\} \quad (2.22)$$

2.3 鏡面修整関数

鏡面修整関数 $f_i(\theta, \phi)$ としては、次の2種類の関数を定める。なお、以下 θ の代わりに次式で定義する t を用いる。

$$t = \theta/\theta_0 \quad (2.23)$$

ここで、 θ は点 F から副反射鏡を見込む円錐の半頂角である。

(1) 開口形状を変化させる関数

$$f_1(\theta, \phi) = x_1 t^2 (1 - \cos 2\phi) \quad (2.24)$$

$$f_2(\theta, \phi) = x_2 t^3 (\cos \phi - \cos 3\phi) \quad (2.25)$$

このうち、 f_1 は $\phi=0$ および π では 0 となり $\phi=\pi/2$ および $3\pi/2$ で最大となる関数であり、中心断面(ZX 面)の形状を保ち、これに直交する断面(YZ 面)内の形状を変えるのに適当である。また、 f_2 は $\phi=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ で 0 となり、 $\phi \doteq 0.3\pi$ および 1.7π で最大、 $\phi \doteq 0.7\pi$ および 1.3π で最小となる関数であり、中心断面およびこれに直交する断面内の形状を保ち、主反射鏡開口の形状の上下

の非対称性を補正するのに適当である．ここで， x_1, x_2 は変形の大きさを変えるパラメータである．この f_1, f_2 は開口形状を変化させるのに適当な関数である．しかし，開口分布も変えるので， x_1, x_2 は次に示す開口面分布を変える前に決めておく必要がある．

(2) 開口面分布を変化させる関数

$$f_3(\theta, \phi) = x_3 t (1-t^2)^3 \cos \phi \quad (2.26)$$

$$f_4(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^M y_j G_{p(j)}(\theta) H_{q(j)}(\phi) \quad (2.27)$$

ここで， f_3 は反射鏡の外形を保ったまま，原点 F から \mathbf{k}_1 方向に出た光線が副反射鏡で反射された後に主反射鏡に当たる点を中心断面内で変化させる関数であり，例えば，これを開口中心に移動することにより回転対称な開口面分布とする場合等に用いる．更に， f_4 は主反射鏡開口の形状をほとんど変えることなく開口面分布を制御する関数であり，径方向の分布を決める関数 $G_p(\theta)$ と周方向の分布を決める関数 $H_q(\phi)$ との組み合わせで定義している．なお， x_3, y_j は変形の大きさを変えるパラメータである．

$G_p(\theta)$ としては，つぎに示すような径方向の照度分布を全体に一様分布に近付ける関数 G_1 と，一部の照度分布を上げ他の部分の照度分布を下げる関数 G_2 とを用いる．

$$G_1(\theta) = \exp(-\zeta t^2) + \zeta \exp(-\zeta) t^2 - 1 \quad (2.28)$$

$$G_2(\theta) = -\{\exp(-\zeta) - 1 - 2\zeta \exp(-\zeta)\} t^3 / 3 - \{1 - \exp(-\zeta t^2)\} t \quad (2.29)$$

ここで， $G_1(\theta), G_2(\theta)$ は 2.3 (1) で定まった開口形状が変化しないようにつぎの条件を満足している．

$$\left. \frac{dG_1}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_0} = \left. \frac{dG_2}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0 \quad (2.30)$$

これら $G_1(\theta)$, $G_2(\theta)$ の値をそれぞれ図 2.9, 図 2.10 に示す.

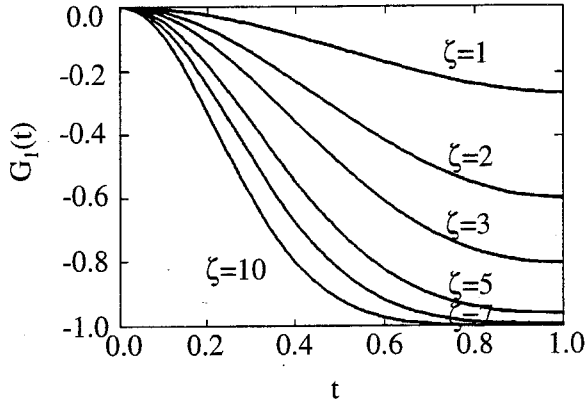


図 2.9 $G_1(t) = e^{-\zeta t^2} + \zeta e^{-\zeta} t^2 - 1$
Fig. 2.9 Curves of $G_1(t) = e^{-\zeta t^2} + \zeta e^{-\zeta} t^2 - 1$

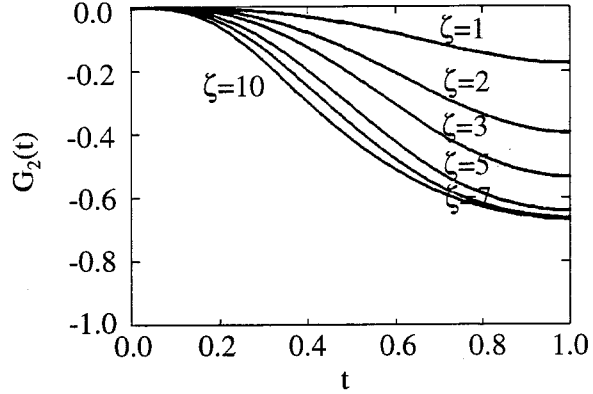


図 2.10 $G_2(t) = -\left\{\frac{e^{-\zeta} - 1 - 2\zeta e^{-\zeta}}{3}\right\}t^3 - (1 - e^{-\zeta t^2})t$

Fig. 2.10 Curves of $G_2(t) = -\left\{\frac{e^{-\zeta} - 1 - 2\zeta e^{-\zeta}}{3}\right\}t^3 - (1 - e^{-\zeta t^2})t$

また, $G_1(\theta)$, $G_2(\theta)$ の曲率に相当する θ に関する 2 次微分である $d^2 G_1(\theta)/d\theta^2$, $d^2 G_2(\theta)/d\theta^2$ はそれぞれ

$$\frac{d^2 G_1(\theta)}{d\theta^2} = \frac{1}{\theta_0^2} \frac{d^2 G_1(t)}{dt^2} \quad (2.31)$$

$$\frac{d^2 G_2(\theta)}{d\theta^2} = \frac{1}{\theta_0^2} \frac{d^2 G_2(t)}{dt^2} \quad (2.32)$$

となり, 図 2.11, 図 2.12 に $d^2 G_1/dt^2$, $d^2 G_2/dt^2$ をそれぞれ示す.

主反射鏡開口面上の照度分布は副反射鏡の曲率によって変化するため図より $G_1(\theta)$ は曲率が正面方向で最大になるので副反射鏡からの放射パターンは正面方向の利得を低く, 他の方向では正面方向に比べ曲率が小さいので相対レベルは上昇し全体として高能率形の分布に近づくことがわかる. また, $G_2(\theta)$ は曲率が正面方向で 0 となり, ある特定方向 ($t=t_u$) で最大値をもつため副反射鏡からの放射パターンは正面方向の利得は変わらず, $t=t_u$ の相対レベルは下がり, 鏡面の端

の方($t > t_0$)でのレベルは上がる。従って、この関数を用いると一部の照度分布を上げ、他の照度分布を下げるができることがわかる。

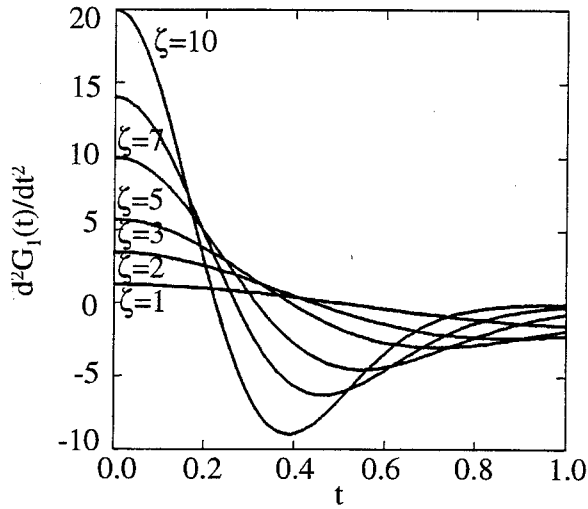


図 2.11 $\frac{d^2 G_1(t)}{dt^2}$

Fig. 2.11 Curves of $\frac{d^2 G_1(t)}{dt^2}$

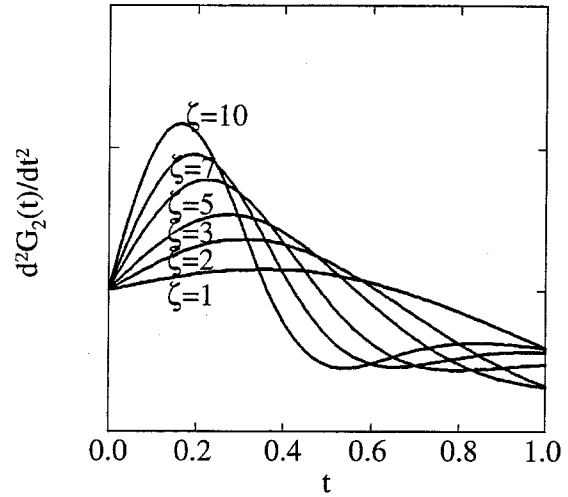


図 2.12 $\frac{d^2 G_2(t)}{dt^2}$

Fig. 2.12 Curves of $\frac{d^2 G_2(t)}{dt^2}$

次に、 $H_q(\phi)$ としては、つぎの各種の関数を用いる。

$$H_1(\phi) = 1 \quad (2.33)$$

$$H_2(\phi) = 1 + \cos 2\phi \quad (2.34)$$

$$H_3(\phi) = 1 - \cos 2\phi \quad (2.35)$$

$$H_4(\phi) = \cos \phi (\cos \phi + 1) \quad (2.36)$$

$$H_5(\phi) = \cos \phi (\cos \phi - 1) \quad (2.37)$$

ここで、 H_1 は ϕ に依存せず全体に寄与する関数、 H_2 は主に中心断面に寄与しこれに直交する面に寄与しない関数、 H_3 は中心断面に寄与せずこれに直交する

面に主に寄与する関数, H_4 は主に $\phi=0$ の面に寄与する関数, H_5 は主に $\phi=\pi$ の面に寄与する関数である.

2.4 高能率楕円ビームアンテナの設計と実測結果

2.4.1 地球局アンテナとして要求される楕円ビームアンテナ

通信衛星の軌道位置の変動範囲は, 静止衛星では, 通常東西および南北ともにある角度範囲に制御されている. 国内通信衛星の場合, 衛星の1日の変動は南北方向が最大 0.1° , 東西方向が 0.03° 程度の楕円形の軌跡を描き, 更に, 東西方向には比較的長い周期で 0.1° の範囲を移動する. このような衛星の動きに合わせて, 地球局アンテナの主ビームを南北に長い楕円形にすれば, 南北方向の追尾が不要となり, 東西方向の追尾のみを間歇的に行えば良い. 従って, 追尾駆動系を大幅に簡易化することができる.

図 2.13 は, 19.5GHz および 29.5GHz について, ビーム正面方向および 0.1° ビーム正面方向から離角した方向(以下オフビームと呼ぶ)の利得と, 開口径との関係を示す. ここで, 開口分布 $A(u)$ はエッジレベルが -10dB のテーパ分布とし, 分布関数として

$$A(u) = 0.684(1-u^2) + 0.316 \quad (2.38)$$

とする. ここで u は正規化半径である. なお, ビーム正面方向の利得には開口分布による利得低下のみを考慮し, スピルオーバーや鏡面誤差による利得低下

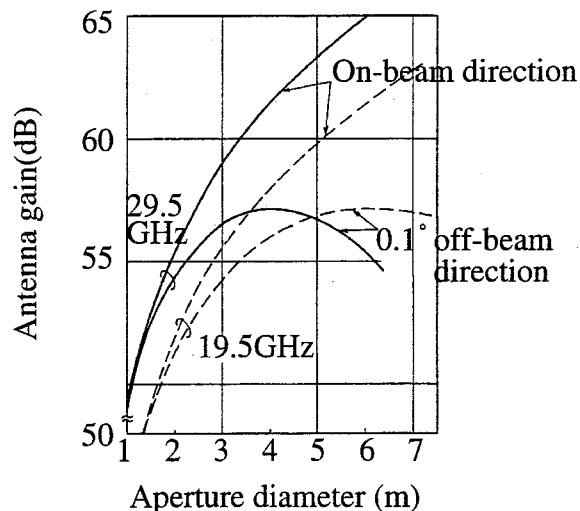


図 2.13 オフビームした場合のアンテナ利得
Fig. 2.13 Antenna gain including off-beam loss

は含まない。図より明らかなように、 0.1° オフビームした場合の利得は、ある開口径で最大となり、それ以上開口径を大きくしてもビーム幅が狭くなるため、逆に利得は低下する。従って、追尾をしない場合には利得および開口径に上限があることが判る。

本アンテナでは、利得の要求値を考慮し、開口面積が直径 3.3m の円形開口アンテナと等価な楕円形開口アンテナとした。楕円形開口で、東西方向の長軸と南北方向の短軸との軸径比 $K(\geq 1)$ を変化した場合のオフビームによる損失を図 2.14 に示す。ここで東西方向は俯角(Az)方向に、南北方向は仰角(EI)方向に対応

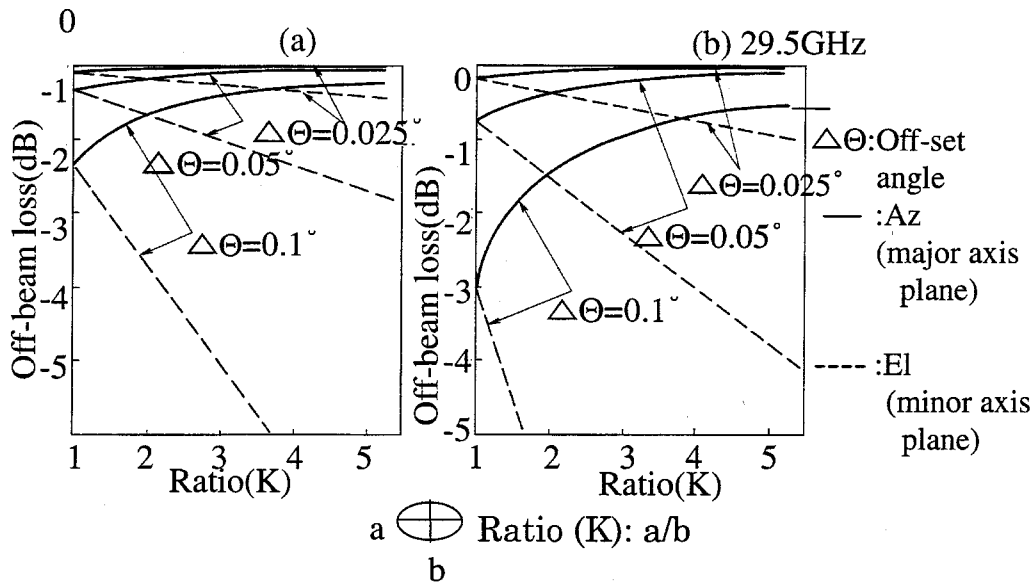


図 2.14 楕円開口の軸径比に対するオフビーム損失

Fig. 2.14 Off-beam loss versus ratio between major and minor axes of elliptical aperture

する。K が大きくなる程南北に長い楕円ビームとなり、オフビーム損失は Az 方向が大きくなり、EI 方向が小さくなる。K を大きくすれば EI 方向の損失は小さくなるが、Az 方向の損失をできるだけ小さく保つためには Az 方向の追尾の頻度を高める必要がある。ここでは、Az 方向の追尾の頻度を極力少なくし、構造上も小形・軽量化を図るため、 $K=2$ とした。この場合の開口形状は、長軸径が 4.7m、短軸径が 2.3m となる。また、図 2.14 から、 0.1° オフビームした場合の損失は 19.5GHz および 29.5GHz でそれぞれ 0.7dB および 1.5dB で、円形開口($K=1$)の場

合に比べ、それぞれ 0.6dB および 1.5dB の改善が見込まれる。また、E1 方向と同程度の追尾損失に押さえるには、Az 方向には衛星が 0.05° 以上移動した時点で追尾を行なう必要があることが判る。

2.4.2 鏡面系の構成と試作アンテナ

基準の 2 次曲面鏡からなる副反射鏡として、双曲面鏡を用いるオフセットカセグレン形の鏡面系を考える。1次放射器には、軸対称ビームを放射するコルゲート円錐ホーンを用い、副反射鏡を適当なエッジレベルで照射するようにその寸法を選定する。つぎに、アンテナ楕円開口として開口の形状が $4.7\text{m} \times 2.3\text{m}$ となるよう 2.3 節の修整関数により鏡面修整する。更に、開口面分布を中心部で一様に周縁部で急峻なテーパをもたせたロールオフ分布とした高能率形とするよう、同様に鏡面修整する。最終的に選定した鏡面系を図 2.15(a)に示す。また、開口面分布の計算値を 19.45 GHz, 29.25 GHz について図 2.15(b-1), (b-2)にそれぞれ示す。

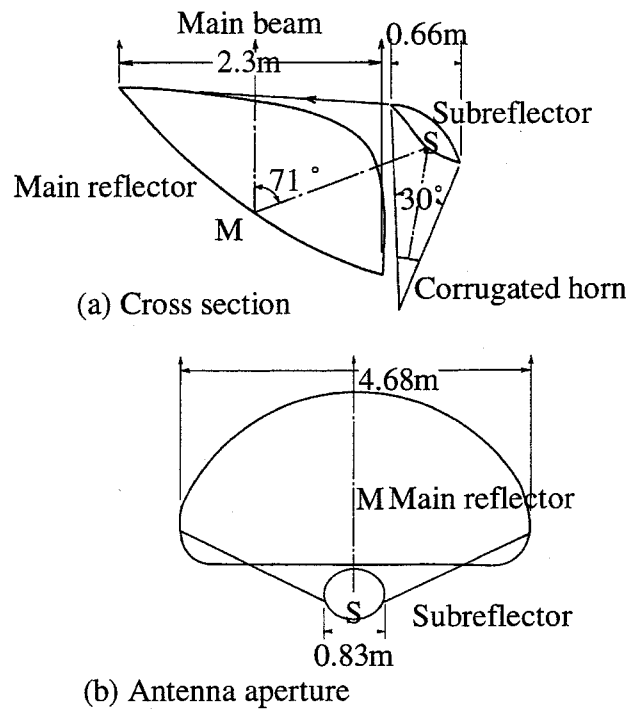


図 2.15(a) アンテナ鏡面系の構成
Fig.2.15(a) Configuration of elliptical beam antenna reflectors

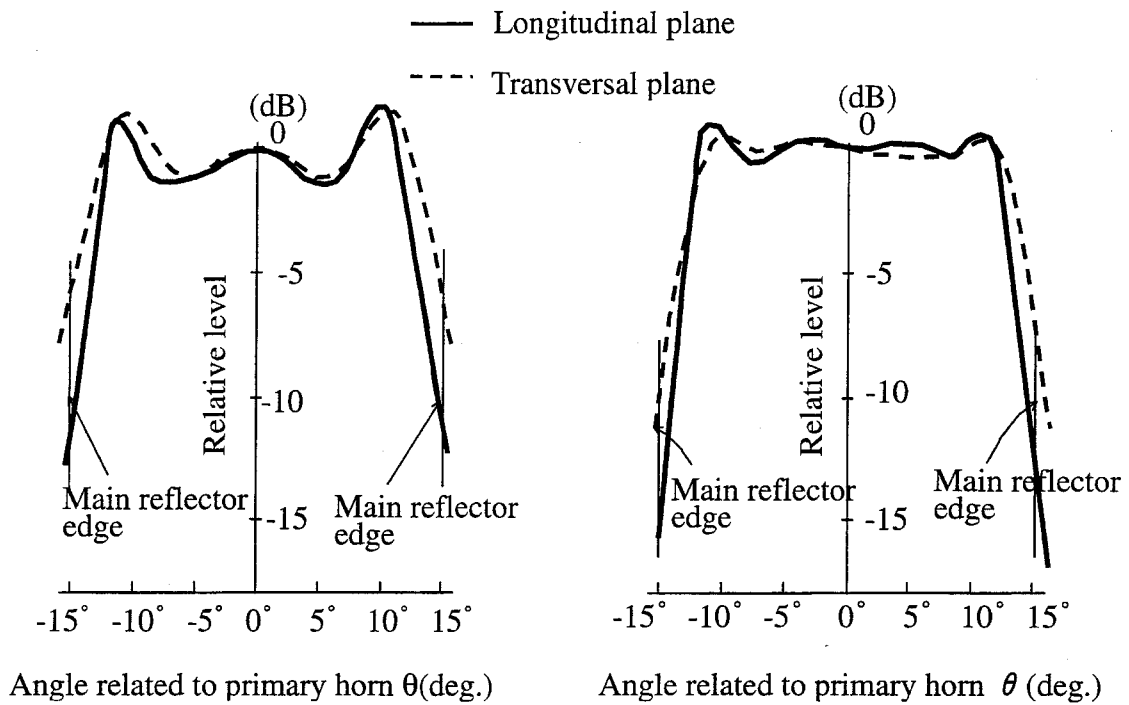


図 2.15(b-1) 開口面分布 (19.45GHz)
Fig. 2.15(b-1) Aperture field distribution (19.45GHz)

図 2.15(b-2) 開口面分布 (29.25GHz)
Fig. 2.15(b-2) Aperture field distribution (29.25GHz)

この設計例ではビーム軸方向からみた開口面の形状は半円形に近い形となっており、試作アンテナの構成を図 2.16 に示す。図は主ビーム仰角が約 45° の運用状態である。アンテナのマウントは Az-El マウント形式で、駆動範囲は Az, El 軸とも $\pm 2^\circ$ の限定駆動方式である。ある地点に設置すれば、El 軸は固定し、Az 軸のみを簡易な駆動系により追尾駆動を行なう。

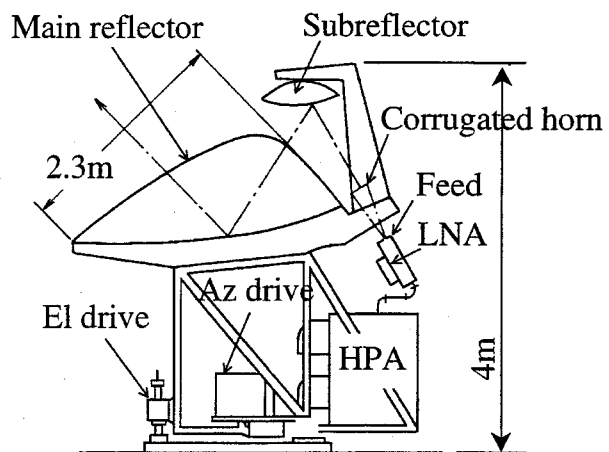


図 2.16 アンテナの構成
Fig.2.16 Configuration of elliptical beam antenna system

2.4.3 放射特性の実測結果

(a) 利 得

円偏波で標準ホーンとの比較により測定した利得の測定結果を図 2.17 に示す. 表 2.1 に, 種々の利得低下要因を考慮した開口能率の計算値を示す. 図 2.17 において, ホーン出力端での値は分波器の損失の実測値を差し引いたものである. 開口能率の実測値は, 20GHz 帯 81%, 30GHz 帯 76%と高能率であり, 表 2.1 の計算値である 20GHz 帯 84%, 30GHz 帯 79%と良く一致している.

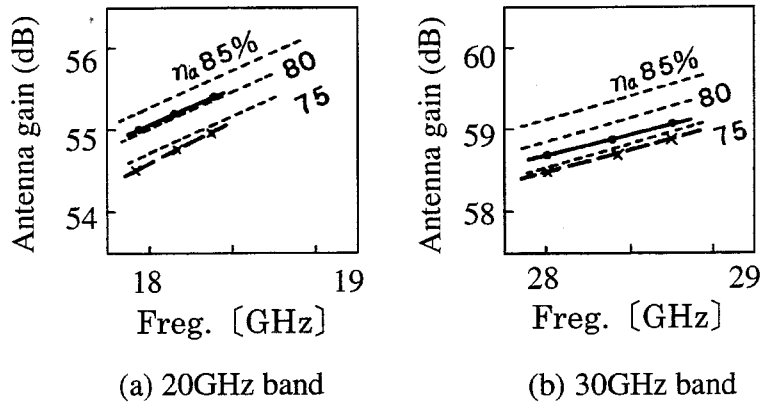


図 2.17 開口能率および利得(実測値)

Fig.2.17 Measured aperture efficiency and antenna gain

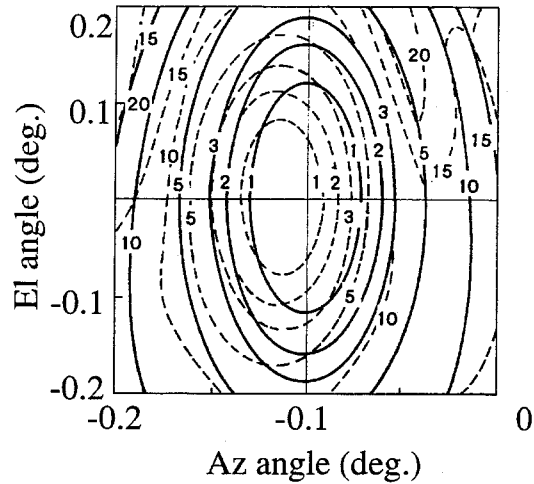
表 2.1 開口能率 η_a (計算値)

Table 2.1 Calculated antenna aperture efficiency η_a

	17.8 GHz	27.6 GHz
Loss of primary horn	-0.14 dB	-0.21 dB
Aperture distribution	-0.36	-0.40
Spillover power	-0.10	-0.10
Surface error	-0.11	-0.28
Blocking due to panel gap	-0.01	-0.01
Setting error	-0.02	-0.04
Aperture efficiency	-0.74 dB 84%	-1.04 dB 79%

(b) 近軸サイドローブ特性

図 2.18 に主ビーム近傍の 2 次元放射パターンを示す。図から Az 面内と El 面内のビーム幅の比は 1:2 と設計値通りの良好な楕円形ビームが得られていることが判る。20, 30GHz では互いに逆旋円偏波を用いているために、いわゆる円偏波でのビームチルト効果のため各ビームの中心がずれているが、これによる利得低下は 0.1dB 程度で実用上問題とはならない。19.5GHz および 29.5GHz における



Note : Relative level to peak level is shown.

— 19.5GHz - - - - 29.5GHz

図 2.18 主ビームの 2 次元パターン (円偏波)

Fig.2.18 Measured main beam contour
(Circular pol.)

Az 面内, El 面内の近軸サイドローブ特性をそれぞれ図 2.19 および図 2.20 に示す。図より近軸放射パターンも計算値とよく一致していることが判る。衛星の南北方向の位置変動 0.1° によるオフビーム損失は, 20 および 30GHz で, それぞれ 0.7dB および 1.7dB であり, 2.4.1 での計算結果とほぼ一致している。なお図 2.19 および図 2.20 の各放射パターンは, 19.5GHz および 29.5GHz の周波数でのビーム中心を基準とした放射パターンとしており, 円偏波によるビームチルト分は除いている。

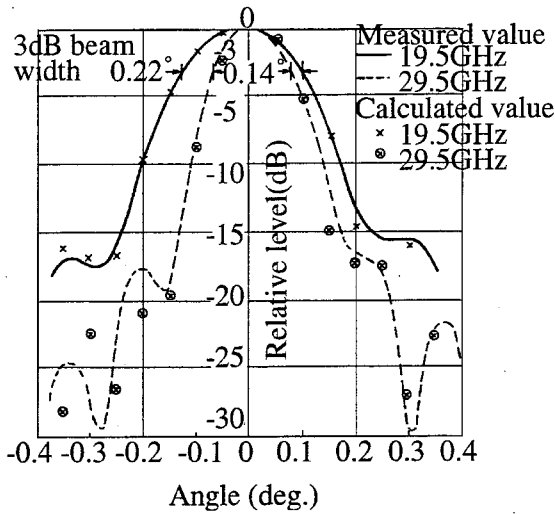


図 2.19 近軸サイドローブ特性 (Az面内)
Fig.2.19 Near-axis radiation patterns in Az plane.

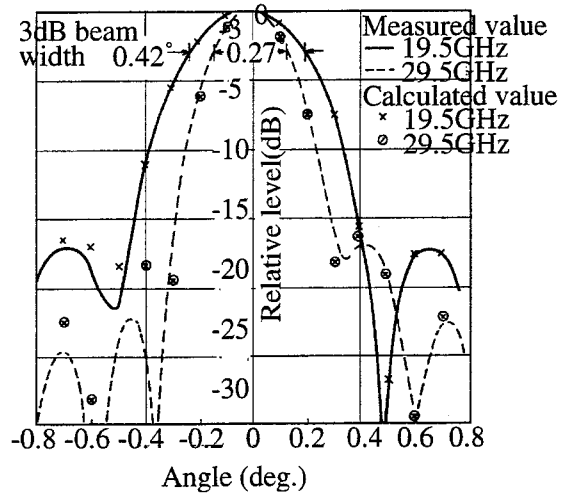


図 2.20 近軸サイドローブ (El面内)
Fig.2.20 Near-axis radiation patterns in El plane.

(c) 広角サイドローブ特性

図 2.21 は 19.5GHz における、 5° までのサイドローブのピーク値の包絡値を示したものである。図から明らかな様に、Az 面内のサイドローブレベルは E1 面よりも低くなっている。これは、この角度範囲ではサイドローブレベルのオフビーム角依存性が開口径対波長比 D/λ により決まるためである。本アンテナでは Az 面の方が E1 面より D/λ が大きくなっており、その効果が現れている。このような特性は、隣接した衛星への干渉を少なくし、静止衛星軌道の有効利用に対して効果的である。 5° 以上 150° にわたる広角サイドローブ特性を図 2.22 に示す。更に、29.5GHz での 5° までのサイドローブのピーク値の包絡値を図 2.23 に、広角サイドローブ特性を図 2.24 にそれぞれ示す。

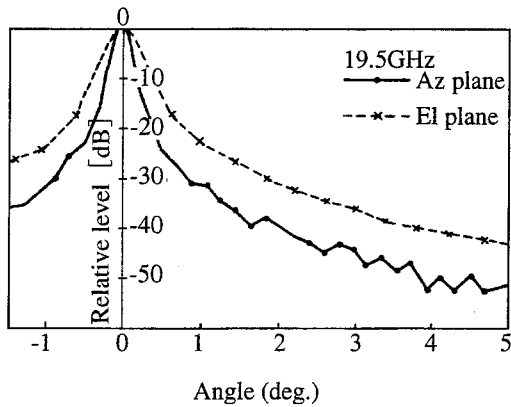


図 2.21 サイドローブピークの包絡値 (19.5GHz)

Fig.2.21 Measured peak envelope of wide-angle radiation patterns (19.5GHz)

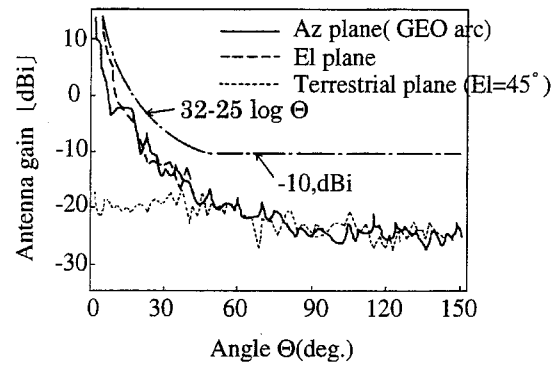


図 2.22 広角サイドローブ特性 (19.5GHz)

Fig.2.22 Measured wide-angle radiation patterns(19.5GHz)

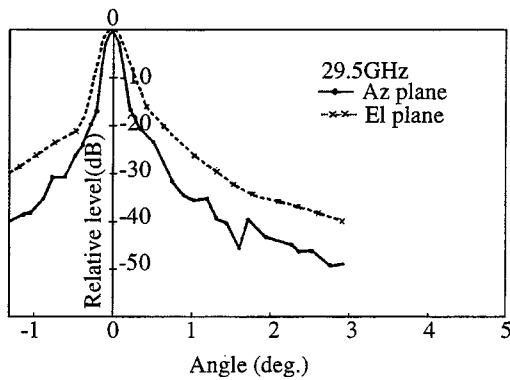


図 2.23 サイドローブピークの包絡値 (29.5GHz)

Fig.2.23 Measured peak envelope of wide-angle radiation patterns (29.5GHz)

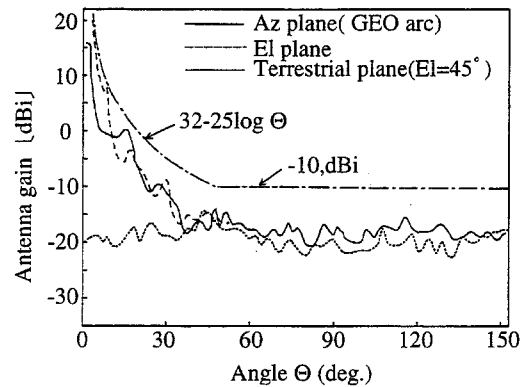


図 2.24 広角サイドローブ特性 (29.5GHz)

Fig.2.24 Measured wide-angle radiation patterns (29.5GHz)

いづれのサイドローブ特性も,

$$G = 32 - 25 \log \Theta, \quad \text{dBi} \quad (2.39)$$

$$(1^\circ \leq \Theta \leq 48^\circ)$$

$$G = -10, \quad \text{dBi}$$

$$(48^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ)$$

を十分満足していることが判る。特に、地上無線回線との干渉を計算する場合に重要な地上水平面内の特性は全周角度範囲で -15dBi 以下であり、優れた低サイドローブ特性を示している。

2.5 むすび

高能率楕円ビームを実現するオフセット形複反射鏡アンテナの設計法、構成および特性について述べた。ここでは、新たな開口波面に基づく鏡面修整法として、あらかじめ基本の2次曲面鏡を与え、これを適当な鏡面修整関数を用いて変形することにより、所望の開口形状および開口面分布を得る手法を考案し、その妥当性を示した。本設計法により、主ビームの形状を衛星の位置変動に合わせて楕円形にしたアンテナを設計した。これにより、南北方向には追尾を不要にし、追尾駆動系を大幅に簡易化できる見通しを得た。楕円形開口に対する鏡面修整により、20GHz帯で81%、30GHz帯で76%の高能率特性が得られた。また、広角サイドローブ特性は $G=32-25\log\Theta$, $\text{dBi}(1^\circ \leq \Theta \leq 48^\circ)$, $G=-10\text{dBi}(48^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ)$ に比べ、5~10dB優れてたものになっている。このような楕円ビームを有するアンテナ方式は、アンテナの低コスト化・静止軌道の有効利用の観点から、今後の小形地球局アンテナの有力な方式になると考えられる。

なお、このアンテナは昭和60年通信の自由化を記念し、郵政省が発行した記念切手の図柄に用いられた。

第3章

低交差偏波オフセット形

複反射鏡アンテナの設計法

3.1 まえがき

前章では高能率・低サイドローブ特性を有する楕円ビームを形成する鏡面修整オフセット形複反射鏡アンテナについて述べた。更に、性能を向上させ直交2偏波による周波数再利用方式に適用させるために、低交差偏波化が必要である。そのため、アンテナ系での交差偏波発生量として、交差偏波成分を主偏波成分に対して-30dB以下にする必要がある。一方、アンテナへの機械的要求条件として、例えば車載用として車の構造に適合すること、可搬用として分割が容易なこと、更には建物屋上に適合するようにアンテナ高さを考慮することなどが出てきてきた。このような機械的要求条件に先の電気的要求条件に加えて、それらを同時に満足するようアンテナを設計する必要がある。

オフセット形反射鏡アンテナの低交差偏波化や交差偏波消去法について、1973年からGraham [17]、田中ら[18]はオフセットカセグレンについて、水口ら[20]はオフセットグレゴリアンについて、さらに、1975年田中ら[19]によって、回転2次曲面鏡系(以下2次曲面鏡系とする)からなる一般のオフセット形複反射鏡アンテナの交差偏波特性が研究された。この研究は等価ホーンリフレクタの概念により、2枚の反射鏡を1枚の放物面鏡からなる等価オフセットパラボラ[16]に置き換え、交差偏波成分を評価する方法であり、2次曲面鏡から構成される2枚反射鏡系など複数枚の反射鏡系の交差偏波消去条件が明らかにされた。

図 3.1 はその概念図を示している。この研究は鏡面修整をしていない通常の2次曲面鏡系での低交差偏波化の研究であった。

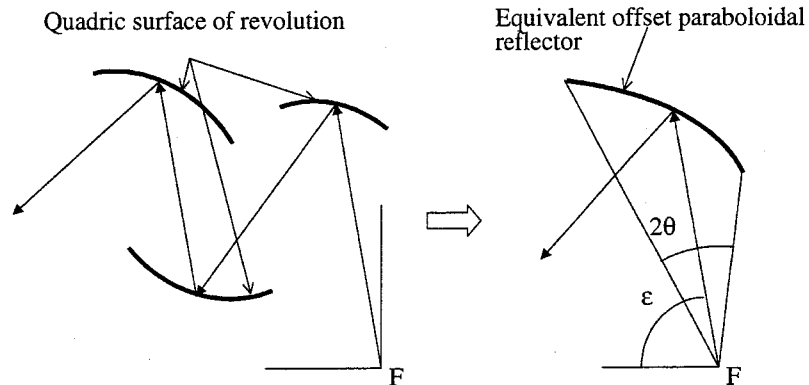


図 3.1 等価オフセットパラボラ

Fig.3.1 Equivalent offset paraboloidal reflector

交差偏波特性を含めたオフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整

の研究が, 1979 年 Galindo ら[22], 1979 年 Lee ら[32], 1982 年 Mittra ら[33], 1984 年刈込ら[34]によってなされた。これらの研究はいずれも従来の回転対称形反射鏡アンテナの鏡面修整の幾何光学的条件である鏡面上の反射の法則, 電力保存の法則および光路長一定の法則の 3 条件および開口面分布の回転対称性を加えた計 4 個の条件より導かれた連立偏微分方程式を数値積分することにより鏡面座標を求めている。なお, 開口面分布の回転対称性は, 図 3.2 に示すように一次放射器より放射された球面波面を極座標形 (r, θ, ϕ) を用いて表し, アンテナ開口の平面波面を円筒座標系 (z, u, ϕ) を用いて表したとき, $\phi = \phi'$ とすることで表される。これは一次放射器の開口をアンテナ開口に写像することにより, 一次放射器に回転対称性のよいホーンを選べばアンテナの交差偏波の発生が小さくできるという仮定に基づいている。なお, 数値積分において可積分条件を考慮している。この研究は任意の初期値に対し, 所望の開口形状, 開口面分布を有し, かつ交差偏波のない鏡面修整を目指すもので

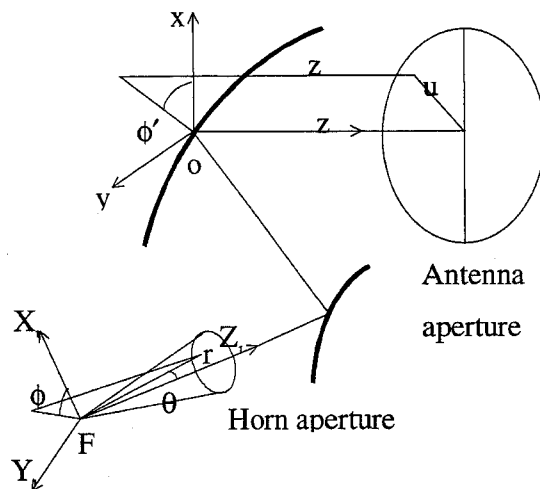


図 3.2 一次放射器開口とアンテナ開口との関係

Fig.3.2 Relationship between horn aperture and antenna aperture

あったが、これらの条件をすべて同時に満足する解はなく、どれか 1 つの条件を近似的に満足させて鏡面修整とした。

その結果、振幅分布が完全には所望のものとはならない[22], [32], 主反射鏡からの放射ベクトルに方向誤差を生じるために交差偏波が劣化する[33], 初期値を適当に選べばこの近似が無視できる程度に小さくでき、実質的には上記 5 条件を満足できる解が求められる[34]などが明らかになった。

これに対し、1975 年に水口ら[36], 1981 年に Westcott ら[23], 1986 年に野本ら[24], 1987 年に Galindo ら[25]により、 $\phi=\phi'$ の条件をはずした鏡面上の反射の法則、電力保存の法則、光路長一定の法則および可積分条件の 4 条件で鏡面修整する手法が研究された。これらの研究はいずれも上記 4 条件より求められる連立偏微分方程式を数値積分し、鏡面座標を幾何光学的に求めるものである。この設計法は、幾何光学的意味においては、厳密な解を与えうるものであるが、与える一次放射パターンと開口面分布とがいずれも回転対称である場合への適用を考慮したものである。従って、楕円ビームアンテナへの適用が難しく、また与える一次放射パターンは実際の放射パターンと必ずしも一致しないため実際の開口面分布と差異を生ずる。更には、鏡面座標は微分方程式を数値的に解くことにより得られるため、離散的な座標しか得られない、解の精度が必ずしも十分でないなどの欠点がある。また、交差偏波については自由度がなく、その発生量は初期値に依存することになる。この初期値は用いる鏡面修整法によりその定義が異なる拘束条件であり、通常は初期値を変えると、交差偏波発生量が変わるとともに鏡面の形状も変わる。従って、電氣的条件と機械的条件を同時に満足する初期値を与えるためには、先に示したいずれの鏡面修整法においても、鏡面形状や交差偏波特性は、与えられた初期値に対し偏微分方程式を数値的に解いて初めて決定されるため、同じ手順での繰り返し計算を行い最適解を求めることが必要となる。それに対し、ここでは機械的条件のほとんどが図 3.3 に示すオフセット形複反射鏡アンテナの中心断面(縦断面)の鏡面形状に依存し、一方鏡面系に起因する交差偏波の発生量は中心断面に直交する面内(横断面)の鏡面形状に依存することに着目し[10], [58], 第 2 章の鏡面修整法を改良し、

交差偏波の発生を抑えながら機械的条件を満足する鏡面系を容易に得る方法を示す。

前章で示したように、初期値を2次曲面鏡で与えるものとし、図3.4に示すように所望の開口形状(外周)を得るための鏡面修整においては中心断面の鏡面形状は初期値から変化しないように鏡面修整関数を定義し、一方、図3.5に示すように所望の開口面分布を得るための鏡面修整においては中心断面の副反射鏡のエッジの法線方向は初期値から変化しない鏡面修整関数を定義している。このように初期値を定義しているので初期値の中心断面形状と修整後の断面形状がほとんど同じになるため、機械的条件を満足するような初期値の2次曲面鏡系を選定すれば、鏡面修整後の鏡面系も機械的条件を満足することになる。

一般的には先に述べた幾何光学的に交差偏波消去条件を満足している系に鏡面修整を施せば、その条件を大幅にくずし、交差偏波成分は-20dBまで劣化することもある。よって、

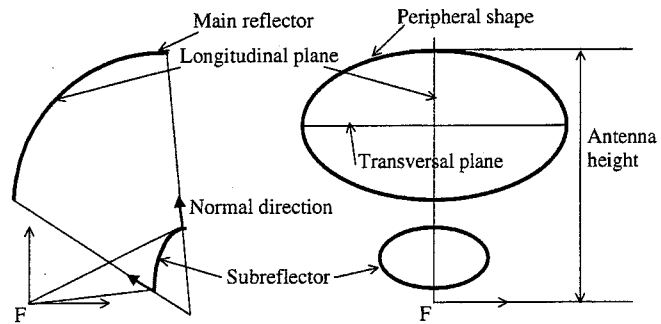


図 3.3 オフセット複反射鏡アンテナの縦断面と横断面

Fig.3.3 Longitudinal and transversal planes of offset dual reflector antenna

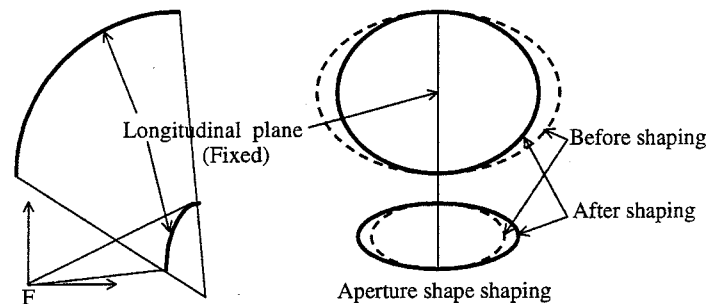


図 3.4 開口形状についての鏡面修整

Fig.3.4 Reflector shaping of reflector aperture shape

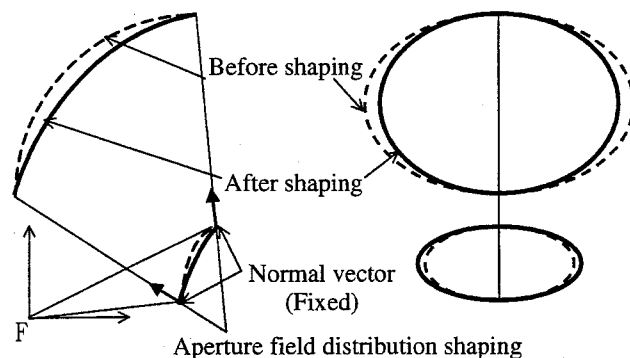


図 3.5 開口分布についての鏡面修整

Fig.3.5 Reflector shaping of aperture field distribution

鏡面修整後に低交差偏波特性をもつアンテナとするには、鏡面修整前には交差偏波消去条件を外し、鏡面修整後に交差偏波消去条件を満足するような初期値を選定すればよいことになる。そのため、オフセット形複反射鏡アンテナの交差偏波成分の発生量はその水平面内における鏡面の形状によってほとんど決まることに着目し、この面内の形状を回転2次曲面鏡系に置き換え、この回転2次曲面鏡系を鏡面修整することにより、鏡面修整後に交差偏波消去条件を満足する初期値を見出す。このように、初期値を求める方法として、オフセット鏡面系を回転対称鏡面系へ置き換え、それに鏡面修整する手法(鏡面置換法)を新たに考案した[48]。

この研究を主および副反射鏡から構成される2枚反射鏡アンテナである、オフセット形楕円ビームアンテナの設計に適用した。設計したアンテナは楕円開口が長径2m、短径1mの14/12GHz帯のオフセットグレゴリアンアンテナであり、いわゆるVSAT(Very Small Aperture Terminal)やSNG(Satellite News Gathering)システムに使用されるアンテナである。更に、円形開口のオフセット形カセグレンアンテナの設計例をも示す。3.2節に低交差偏波修整鏡面の設計法を、3.3節に初期値の選定のために用いる回転対称鏡面系の置換法を、3.4節に設計例とその実測結果を示す。

3.2 鏡面設計法

3.2.1 2次曲面鏡系の設計パラメータ

図3.6(a)に2枚の2次曲面鏡よりなる複反射鏡アンテナの設計パラメータを示す。図において、副反射鏡は点 F 、 F_1 を焦点とする2次曲面鏡、主反射鏡は点 F_1 を焦点とし Z 軸を鏡軸とする放物面鏡である。また、点 F から一次放射器の中心軸に沿って出た光線が各反射鏡に当たる点をそれぞれ S_0 、 M_0 とする。

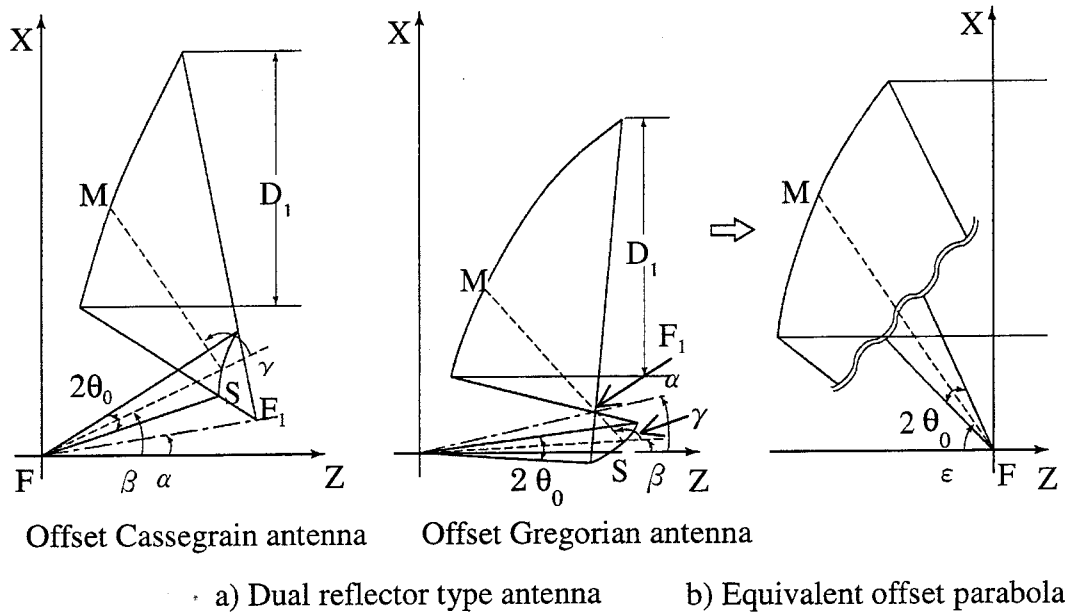


図 3.6 回転二次曲面鏡系での設計パラメータ

Fig.3.6 Design parameters of reflectors of quadric surface of revolution

このとき、このアンテナにおける設計パラメータは 6 個であり、まず次のものを選ぶ。

D_m : 主反射鏡開口径

$2\theta_0$: 点 F_0 を頂角として副反射鏡周辺を見込む円錐の頂角

α : $\overline{FF_1}$ と Z 軸とのなす角

β : 点 F_1 を頂角として副反射鏡周辺を見込む円錐の軸と Z 軸とのなす角度

e_s : 副反射鏡の離心率

a_s : 副反射鏡の定数で $OF=2a_s e_s$

これらのパラメータを用いると、図 3.6(b)に示す等価オフセットパラボラのオフセット角 ϵ は次式で表される。

$$\tan \frac{\varepsilon}{2} = - \frac{\bar{e} \sin \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right) - \sin \frac{\beta}{2}}{\bar{e} \cos \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right) + \cos \frac{\beta}{2}} \quad (3.1)$$

ここで,

$$\bar{e} = \delta p e_s \quad (3.2)$$

である. δ, p は副反射鏡の形状を表すパラメータであり, 点 F から見た時, 凹面鏡の場合は $\delta = 1$, 凸面鏡の場合は $\delta = -1$, また $p = 1$ は楕円鏡, $p = -1$ は双曲面鏡を表している. なお, 等価オフセットパラボラの開口径 D_m および点 F から反射鏡を見込む角 $2\theta_0$ は, 元の反射鏡アンテナのものと同一である. 式(3.1)の交差偏波消去条件において $\varepsilon = 0$ とすることより次式を得る.

$$\bar{e} = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\sin \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right)} \quad (3.3)$$

また, 点 F から点 S_0 までの距離 R_s , 点 S_0 から点 F_1 までの距離 P_s はそれぞれ次式で示される.

$$R_s = \frac{\delta p a_s (\bar{e}^2 - 1)}{1 + \bar{e} \cos(\beta - \alpha)} \quad (3.4)$$

$$P_s = p (R_s - 2a_s) \quad (3.5)$$

更に, $\overrightarrow{FS_0}$ と $\overrightarrow{S_0M_0}$ とのなす角 γ は次式で求められる.

$$\tan \gamma = \frac{2 a_s \bar{e} \sin(\beta - \alpha)}{R_s - 2 a_s \bar{e} \cos(\beta - \alpha)} \quad (3.6)$$

ここで, $2 a_s e_s$ は FF_1 間の距離である.

3.2.2 設計の基本原理

鏡面修整には、所望の開口形状を得るための鏡面修整と、所望の開口面分布を得るための鏡面修整とがある。前章 2.3 節に示した鏡面修整関数は次の条件で選定されている。

- (1) 図 3.4 に示すように所望の開口形状を得るための鏡面修整においては中心断面の形状は初期値から変化しない。
- (2) 図 3.5 に示すように所望の開口形状を得るための鏡面修整においては中心断面の副反射鏡エッジの法線方向は初期値から変化しない。

このように初期値を定義しているので、

- (1) 副反射鏡の中心断面の形状は、一般に鏡面修整前後で大きく異なることはない。
- (2) 主反射鏡の中心断面の形状は、中心断面の副反射鏡の形状、特にそのエッジの法線方向と中心断面内の主反射鏡開口径とで決まるが、いずれも鏡面修整前後で変化しないので、主反射鏡の中心断面の形状も鏡面修整前後で大きく異なることはない。

従って、初期値の中心断面形状と、鏡面修整後の中心断面形状とはほとんど同じになる。機械的条件のほとんどは中心断面形状で決まるため、初期値の 2 次曲面鏡系が機械的条件を満足していれば、鏡面修整後の鏡面系も機械的条件を満足する。

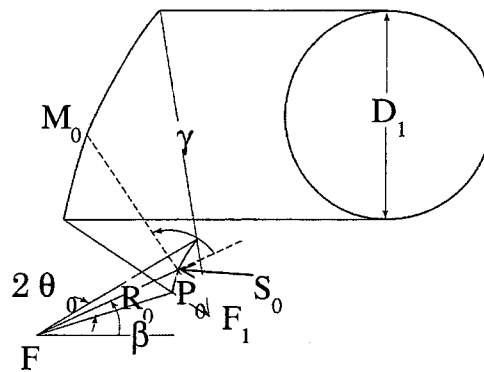
このとき、修整鏡面における交差偏波成分の発生量は初期値として与える 2 次曲面鏡系に依存するため、その選定法が重要になる。本章では、新たに考案した初期値の選定法を述べる。この方法は、オフセット形アンテナの交差偏波成分の発生量は水平面内における鏡面中心部の形状によってほとんど決まることに着目し、鏡面修整後における水平面内の鏡面中心部の形状を表す“代表的な 2 次曲面鏡系”を求め、この 2 次曲面鏡系が交差偏波消去系となるように、初

期値となる 2 次曲面鏡系を決定するものである。このような初期値の選定法を“鏡面置換法”とよぶ。

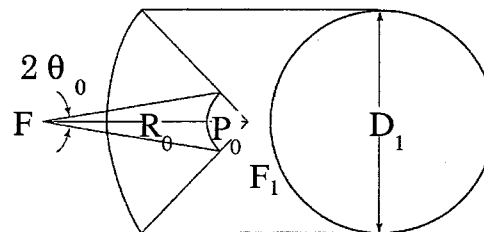
設計手順

鏡面修整後に交差偏波消去系となるような初期値を決定する手順を以下に示す。なお、開口形状は楕円となるように鏡面修整する場合、中心断面内の開口系を D_1 ，水平面内の開口径を D_2 とする。

- (1) 図 3.7 に示すように、
機械的条件を満足する
開口径 D_1 のオフセッ
ト形 2 次曲面鏡系（鏡
面系 A とする）を基準
値として与え、その水
平面内の鏡面形状を回
転対称 2 次曲面鏡系（鏡
面系 B とする）に置き
換える。



(a) Reflector system configuration A



(b) Reflector system configuration B

- (2) 手順(1)で決めた回転対
称 2 次曲面鏡系（鏡面系
B）を初期値として、図
3.8 に示すように副反
射鏡の外形を変えずに、
開口径 D_2 となるよう
にこの鏡面を鏡面修整
し、その形状を表す回
転対称 2 次曲面鏡系（鏡面
系 C とする）を求める。

図 3.7 鏡面系 A から B への置き換え
Fig.3.7 Transformation from reflector system configuration A to B

- (3) 手順(2)で決めた回転対称2次曲面鏡系(鏡曲系 C)を初期値として, 鏡面系の外周を変えずに, 所望の開口面分布となるようにこの鏡面を 3.3 節で示す回転対称鏡面系置き換えにより, 鏡面中心部の形状を表す“代表的な2次曲面鏡系”として回転対称2次鏡面鏡系(鏡面系 D とする)を求める.

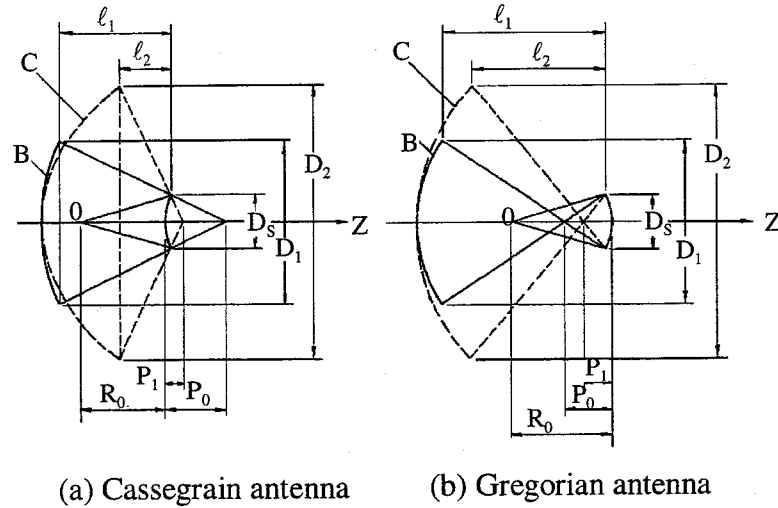


図 3.8 鏡面系BからCへの置き換え
Fig.3.8 Transformation of reflector configuration from B to C

- (4) 手順 (3)で求めた回転対称2次曲面鏡系(鏡曲系 D)を水平面内の鏡面形状とするオフセット形2次曲面鏡系(鏡面系 E とする)を求める.
- (5) 手順(4)で決めたオフセット形2次曲面鏡系(鏡面系 E)のパラメータを用いて, 式(3.1)より等価オフセットパラボラのオフセット角 ϵ を計算する.
- $\epsilon = 0$ であれば, (1)の鏡面系 A が初期値である. $\epsilon \neq 0$ であれば基準値(鏡面系 A)のパラメータを変えて, 手順 1 に戻る.

図 3.9 に初期値の選定手順を図示している. 手順(1)から(5)より $\epsilon = 0$ となる解を探す手法としては2分法がある. なお, 鏡面系 A, B, C, D, E の置き換えは, 6 個の設計パラメータを D_m , θ_0 , β , γ , R_s , P_s に選び, 表 3.1 に示すように次の条件で行う.

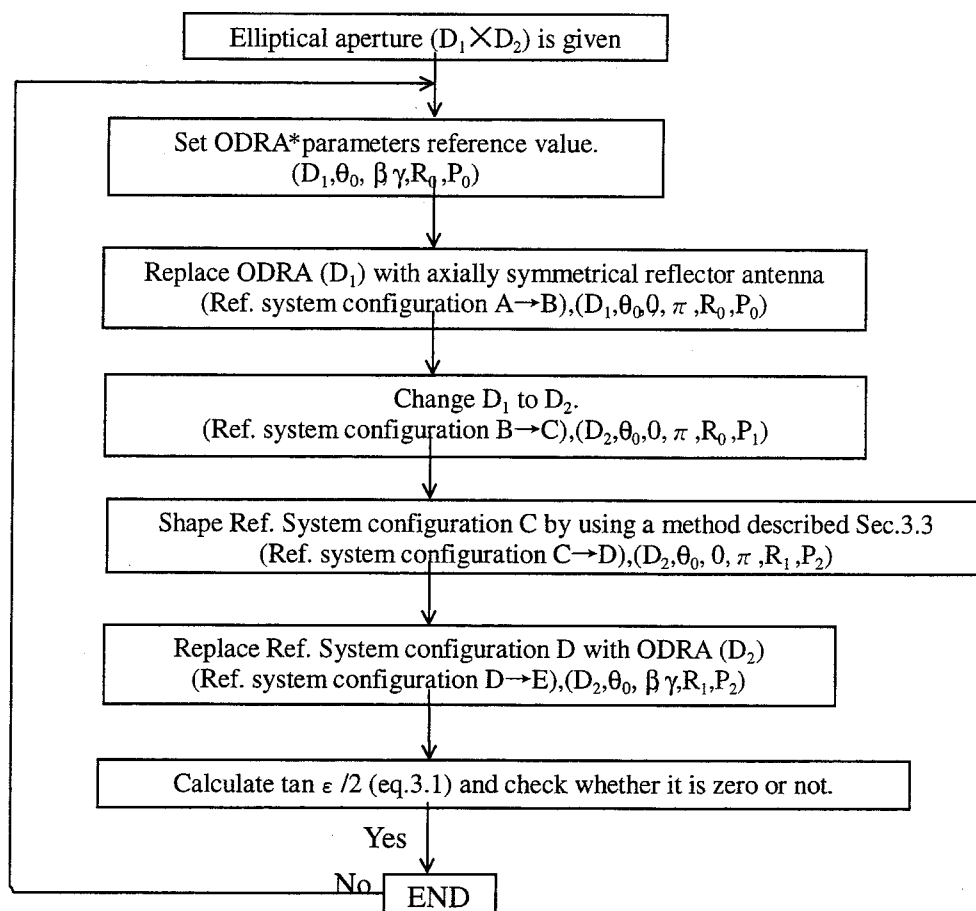


図 3.9 鏡面修整のための初期値の決定手順

Fig.3.9 Determination procedure of initial values for the reflector shaping

(1) 各鏡面系 A, B, C, D, E においては θ_0 を変えない。

(2) 鏡面系 A と B とでは開口径 D_m を D_1 , 鏡面系 C, D および E では開口径 D_m を D_2 とする。

(3) 鏡面系 A と E では, オフセットに起因する設計パラメータ β, γ を変えない。

表 3.1 鏡面系置き換えの条件

Table 3.1 Condition of reflector system configuration transformation

Ref. Conf.	A	B	C	D	E
D	D_1	D_1	D_2	D_2	D_2
θ_0	θ_0	θ_0	θ_0	θ_0	θ_0
β	β	0	0	0	β
γ	γ	π	π	π	γ
R_s	R_0	R_0	R_0	R_1	R_1
P_s	P_0	P_0	P_1	P_2	P_2

- (4) 鏡面系 A から B への置き換え および D から E への置き換えにおいては R_s , P_s を変えない.

以上の選定法により決まった初期値をもとに、第2章の鏡面修整法により鏡面修整することで、機械系を満足し、かつ鏡面修整後の交差偏波の発生が少ない鏡面系を求めることができる。また、鏡面修整後の交差偏波特性は鏡面系 E により評価できる。

なお、鏡面系 A から B の置き換えおよび D から E の置き換えは、表 3.1 により一義的に行うことができる。従って、残る問題は鏡面系 B から C, C から D の回転対称系での置き換えのみとなる。

3.3 回転対称鏡面系の置き換え

3.3.1 鏡面系 B から C の置き換え

鏡面系 B から C への変換は図 3.8 に示すように幾何学的に行うものとする。図 3.8 において、実線は開口径 D_1 の鏡面系 B, 破線は開口径 D_2 の鏡面系 C を表している。以下、鏡面系 B と鏡面系 C とでは、開口径が変わることによって副反射鏡の外形形状が変わらずに P_s だけが変化するものとして、鏡面系 B の P_0 があたえられた場合の、鏡面系 C の P_1 の求めかたについて考える。

図 3.8 において、副反射鏡の厚みを無視すると、次式が得られる。

$$l_1 = \frac{P_0}{D_s} (D_1 - pD_s) \quad (3.8)$$

$$l_2 = \frac{P_1}{D_s} (D_2 - pD_s) \quad (3.9)$$

ここで、 D_s は副反射鏡の開口径であり、次式で決まる。

$$D_s = 2R_0 \tan \theta_0 \quad (3.10)$$

また、光路長一定の条件が成り立つので、次式が得られる。

$$l_1 + \sqrt{l_1^2 + \left(\frac{D_1 - pD_s}{2}\right)^2} = l_2 + \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{D_2 - pD_s}{2}\right)^2} \quad (3.11)$$

式(3.8), (3.9)を式(3.11)に代入すると、結局 P_1 は次式となる。

$$P_1 = \frac{C^2 - \left(\frac{D_s}{2}\right)^2}{2C} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{D_1 - pD_s}{D_2 - pD_s} \left\{ P_0 + \sqrt{P_0^2 + \left(\frac{D_s}{2}\right)^2} \right\}$$

3.3.2 鏡面系 C から D の置き換え

D_2 , θ_0 , R_0 , P_1 で決まる鏡面系 C から D への置き換えを行うためには、鏡面系 C を初期値とする修整鏡面を求める必要がある。ここでは、鏡面系 C を以下に示す鏡面修整法により鏡面修整し、鏡面系 D を求める。すなわち、修整鏡面を回転対称 2 次曲面鏡

群で表示することにより、鏡面中心部の形状を表す“代表的な 2 次曲面鏡系”(鏡面系 D)を導出する。

図 3.10 において、点 S_x を求める修整副反射鏡上の点とする。従来の方法では、点 F と S_x との距離 R_s を変数として、

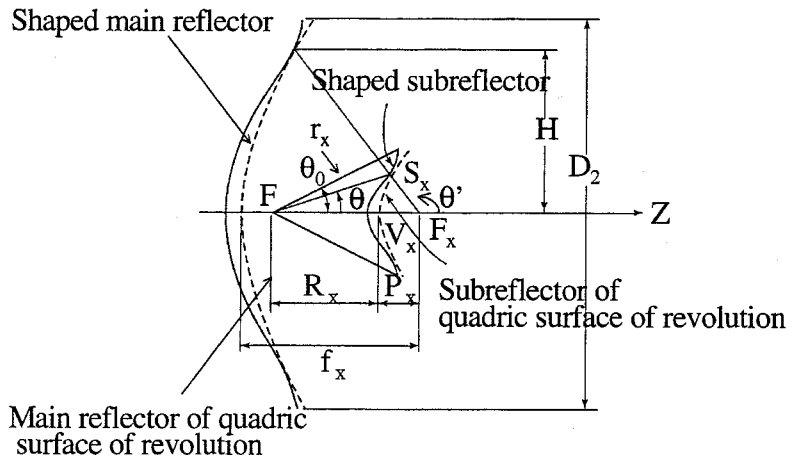


図 3.10 修整鏡面の二次曲面表示

Fig.3.10 Shaped reflector system presented by a reflector system composed of quadric surface of revolution

点 F から副反射鏡への光線が中心軸(Z 軸)からなす角度 θ に関する常微分方程式を得ていた。本研究では、図 3.10 の破線で示すように、鏡面定数の異なる回転対称 2 次曲面鏡群で副反射鏡を表示するものとする。この回転対称 2 次曲面鏡の頂点を V_x とするとき、点 F と V_x との距離 R_x を変数とする θ に関する常微分方程式を得る。これらの鏡面定数の異なる回転対称 2 次曲面鏡群のエンベロープが修整副反射鏡面となる。この方法により、鏡面中心部の形状を表す“代表的な 2 次曲面鏡系”(鏡面系 D)を求めることができる。

以下に図 3.10 に示す鏡面系に対する具体的な鏡面修整法を示す。この鏡面修整法において、従来の方法と同様に、光路長一定の条件、電力保存則および反射の条件を用いる。

(1) 光路長一定の条件

副反射鏡を回転対称 2 次曲面鏡群で構成すれば、主反射鏡はそれぞれの回転対称 2 次曲面鏡に対して光路長一定の条件から定まるパラボラで構成される。なお、これらの回転対称 2 次曲面鏡群、パラボラ群の鏡面定数は θ に起因する場所の関数である。

いま、点 F を含み、Z 軸に垂直な面を主反射鏡の開口面とすると、光路長 C_4 は次のようになる。

$$C_4 = 2f_{mx} - 2pP_x \quad (3.13)$$

ここで、 f_{mx} 、 P_x はそれぞれある θ に対して決まる回転対称 2 次曲面鏡のパラメータで、 f_{mx} は主反射鏡の焦点距離、 P_x は副反射鏡の頂点 V_x と焦点 F_x との距離で、式(3.5)の P_s に相当する。また、 a_s 、 \bar{e} に対応するパラメータ a_x 、 \bar{e}_x を用いると、式(3.4)の R_s に相当する R_x および P_x はそれぞれ次のように示される。

$$R_x = \delta p a_x (\bar{e}_x - 1) \quad (3.14)$$

$$P_x = \delta a_x (\bar{e}_x - 1) \quad (3.15)$$

(2) 電力保存則

図 3.10 のパラメータを用いて変数 B を導入し，電力保存則を表すと次のようになる．

$$B = \frac{H}{\sin \theta} \quad (3.16)$$

ここで， H は次式で決まる θ の関数である。

$$\frac{\int_0^\theta |E_p(\theta)|^2 \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_0} |E_p(\theta)|^2 \sin \theta d\theta} = \frac{\int_0^H |E_d(u)|^2 u du}{\int_0^{\frac{D}{2}} |E_d(u)|^2 u du} \quad (3.17)$$

なお， $E_p(\theta)$ は一次放射器の放射パターン， $E_d(u)$ は主反射鏡開口における所望の開口面分布である．例えば，

$$\begin{aligned} E_p(\theta) &= \cos^m \theta \\ E_d(u) &= 1 (\text{uniform distribution}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

とすると， \bar{e}_x は次のようになる．

$$\bar{e}_x = \frac{C_4 + 2 \left\{ p B \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) - R_x \right\}}{C_4 - 2 \left\{ p B \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) - R_x \right\}} \quad (3.19)$$

(3) 反射の条件

点 S_x での反射の条件は図 3.10 を用いると次のようになる．

$$\frac{1}{R_s} \frac{dR_s}{d\theta} = - \cot \frac{\theta - \theta'}{2} \quad (3.20)$$

ここで， R_s は次式で表される．

$$R_s = R_x \frac{\bar{e}_x + 1}{1 + \bar{e}_x \cos \theta} \quad (3.21)$$

また、 θ' は点 S_x での反射光線と Z 軸とのなす角度であり、

$$\cot \frac{\theta'}{2} = \frac{\bar{e}_x - 1}{\bar{e}_x + 1} \tan \frac{\theta}{2} \quad (3.22)$$

で表される。従って、結局次式が得られる。

$$\frac{1}{R_x} \frac{dR_x}{d\theta} = -\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left\{ \frac{1 - \cos\theta - \left(\frac{\sin\theta}{B}\right) \frac{dB}{d\theta}}{1 - \cos\theta - \frac{C_4}{pB}} \right\} \quad (3.23)$$

このように、式 (3.23) は変数分離形の一階常微分方程式であるから、 R_x は次のようになる。

$$R_x(\theta) = R_0 e^{x_1}$$

$$x_1 = \int_{\theta}^{\theta_0} \tan \frac{\theta}{2} \frac{1 - \cos\theta - \left(\frac{\sin\theta}{B}\right) \frac{dB}{d\theta}}{1 - \cos\theta - \frac{C_4}{pB}} d\theta \quad (3.24)$$

ここで、図 3.11 に示すように θ が θ_0 の時の初期条件は回転対称 2 次曲面鏡系 C であり、このときの R_x が R_0 である。

$$R_0 = R_x (\theta = \theta_0) \quad (3.25)$$

これは、開口面分布を変えるための鏡面修整においては、副反射鏡のエッジの法線方向を変えないものとして鏡面修整時における中心部の形状を表す 2 次曲面鏡系を求めようとしているからである。このとき光路長 C_4 は次式となる。

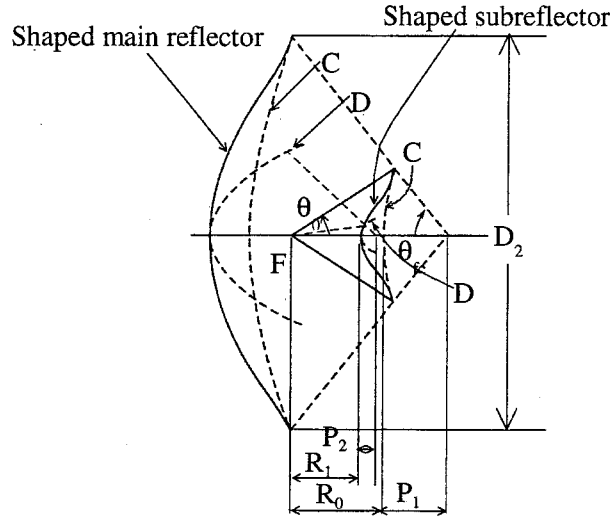


図 3.11 鏡面系CからDへの置き換え
Fig.3.11 Transformation of reflector system configuration from C to D

$$C_4 = 2f_{mc} - 2pP_1 \quad (3.26)$$

ここで、 f_{mc} は鏡面系 C の主反射鏡の焦点距離であり次式で与えられる。

$$\begin{aligned} f_{mc} &= \frac{D_2}{4 \tan \frac{\theta_{fc}}{2}} \\ \tan \frac{\theta_{fc}}{2} &= p \frac{e_c - 1}{e_c + 1} \tan \frac{\theta_0}{2} \\ e_c &= -\frac{R_0 + pP_1}{R_0 - pP_1} \end{aligned} \quad (3.27)$$

また、 θ が 0 の時の回転対称 2 次曲面鏡系が鏡面系 D であり、式(3.24)において $\theta=0$ としたときの R_x が R_1 である。

$$R_1 = R_x (\theta = 0) \quad (3.28)$$

図 3.11 に鏡面系 C から D への置き換えを示している．式(3.19)より \bar{e}_x が，式(3.14)より a_x が決まり，これを式(3.15)に代入して得られる P_x が P_2 である．従って，表 3.1 により鏡面系 E が決まり，式(3.1)より $\tan(\varepsilon/2)$ を計算し交差偏波特性を評価する．

3.4 適用例

3.4.1 楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナの設計と実測結果

ここでは本研究に基づいて設計した開口径 $2\text{m} \times 1\text{m}$ の鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナの設計と実測結果を示す．このアンテナは高能率特性と低サイドローブ特性を保ちながら，低交差偏波特性を実現するもので，Ku 帯の VSAT や SNG 用のアンテナに用いられる．初期値として与えた 2 次曲面鏡系の設計パラメータは次のとおりである．

$$D_1 = 1000\text{mm}, \theta_0 = 38^\circ, \beta = -8.026^\circ, \gamma = 125.1^\circ, R_0 = 180\text{mm}, P_0 = 285.8\text{mm}$$

鏡面修整は，開口の約 80% が一様で，エッジで -15dB のロールオフテーパ分布としている． D_2 は 2000mm であり，一次放射器は開口径 65mm ，長さ 180mm である．

アンテナ開口形状と開口面分布の計算値を図 3.12, 3.13 にそれぞれ示す．更に，図 3.14 にアンテナの一次放射器にコルゲートホーンを使用したときの，放射パターン of the 計算値を示す．

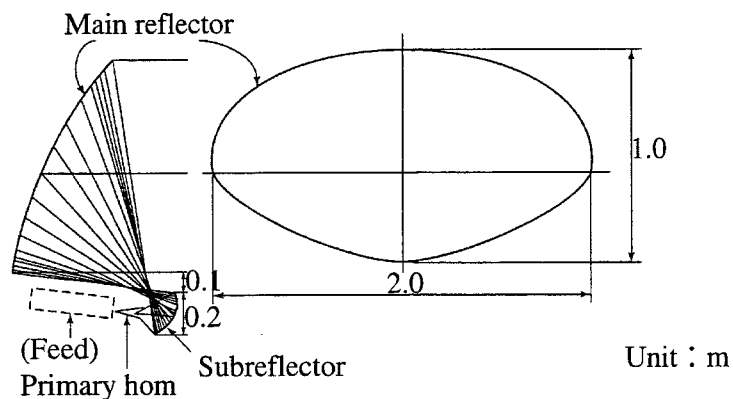


図 3.12 アンテナの構成と開口形状
(楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナ)

Fig. 3.12 Outline of shaped offset Gregorian antenna with an elliptical aperture

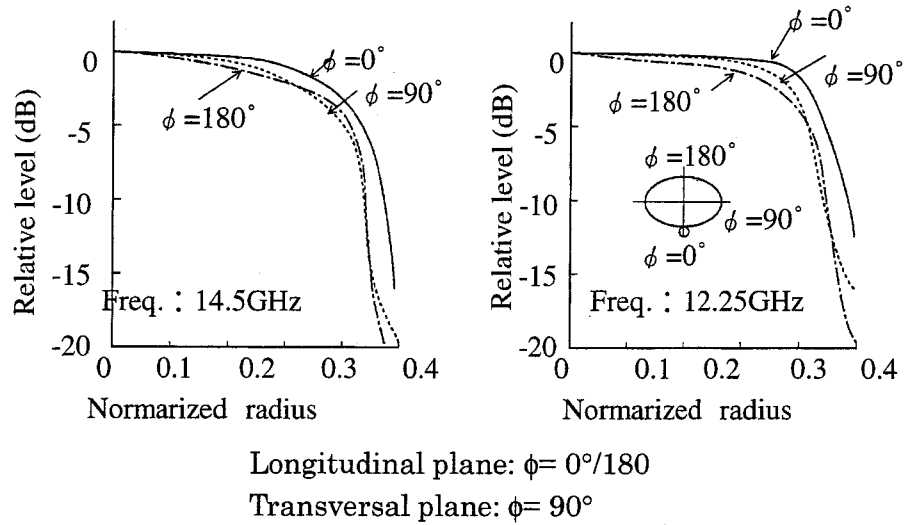


図 3.13 開口面分布の計算値
(楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナ)
Fig. 3.13 Calculated aperture field distribution
(Shaped offset Gregorian antenna with an elliptical aperture)

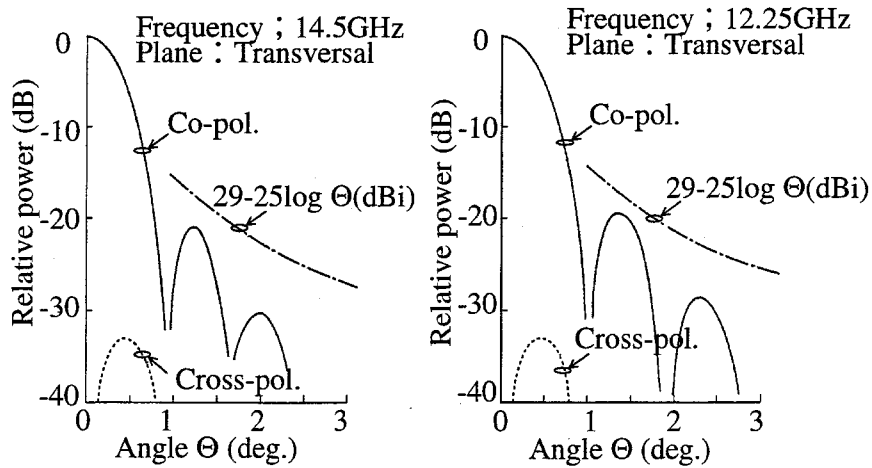


図 3.14 放射パターンの計算値
(楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナ)
Fig. 3.14 Calculated near-axis radiation patterns
(Shaped offset Gregorian antenna with an elliptical aperture)

また、図 3.15 には実測の近軸放射パターンを示す。ここで、一次放射器にはコルゲートホーンに相当する多段フレア形の円錐ホーンを用いている。これらのデータを比較すれば明かなように、実測値はよく理論値に一致している。この場合、交差偏波成分のピーク値は 14.25GHz, 12.5GHz とともに -32dB である。なお、図には示していないが鏡面修整前での交差偏波成分のピーク値は同周波数で -26dB であり、鏡面修整により 6dB 改善されている。更に、広角サイドローブ特性の実測値を図 3.16 に示す。また、このアンテナの主要性能・諸元を表 3.2 に示す。アンテナ開口能率は 14/12 GHz 帯で 70%以上、広角サイドローブ特性は最新の CCIR 勧告値 29-25 $\log \Theta$, dBi 以下を十分満足している。SNG システム用に試作したアンテナ

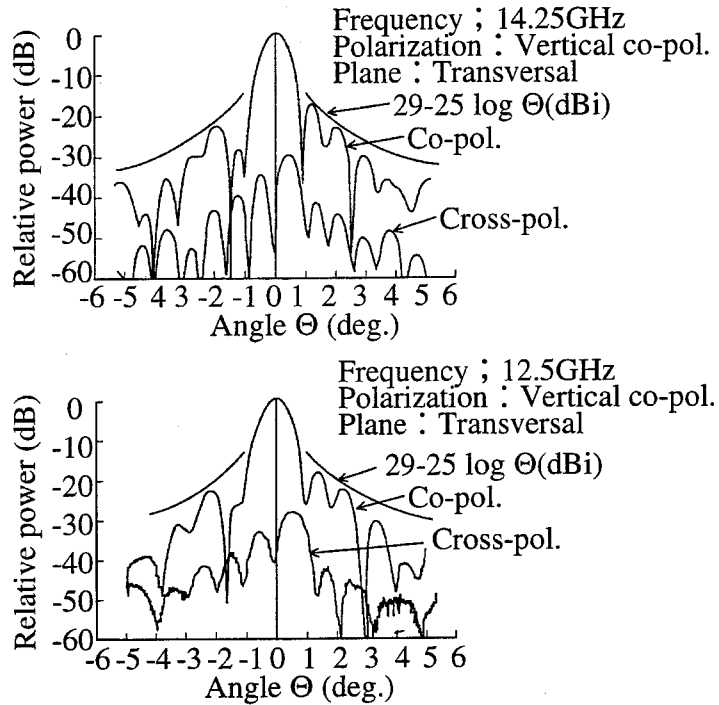


図 3.15 放射パターンの実測値
(楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナ)

Fig. 3.15 Measured near-axis radiation patterns
(Shaped offset Gregorian antenna with an elliptical aperture)

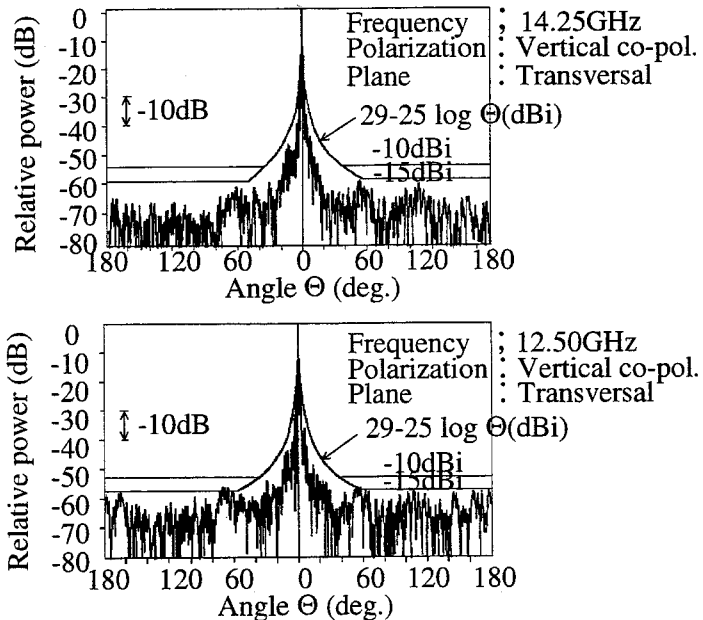


図 3.16 広角サイドローブ特性の実測値
(楕円開口オフセット形グレゴリアンアンテナ)

Fig.3.16 Measured wide-angle radiation patterns
(Shaped offset Gregorian antenna with an elliptical aperture)

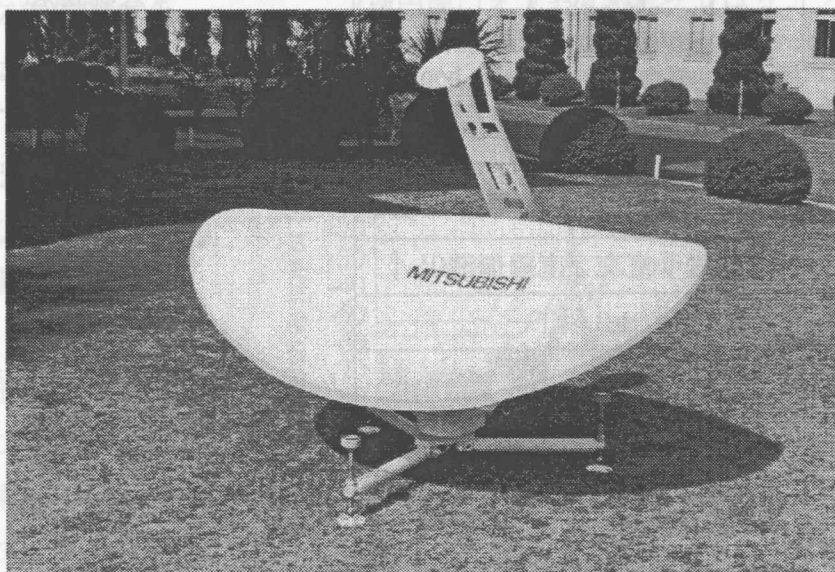
装置として、図 3.17(a)に車載局アンテナ装置を、図 3.17(b)に可搬局アンテナ装置の写真をそれぞれ示す。

表 3.2 SNG システム用アンテナ装置の主要性能・諸元
Table 3.2 Major performance of antenna system for SNG system

電氣的 主要性能			機械的主要性能		
	送信帯	受信帯		可搬局	車載局
周波数	14.0-14.5GHz	12.25-12.75GHz	開口径	直径 1.4m 相当(2m×1m)	
利得	44.8 dBi	43.6 dBi	マウント方式	Az/ El マウント	
開口能率	71%	70%	駆動方式	手動	電動
雑音温度 (El=30°)	——	32K 以下	駆動範囲	Az:±180° El:30-60°	Az:±180° El:30-60°
サイドローブ 特性	29-25 log Θ , dBi (1° ≤ Θ ≤58°) -15 dBi (58≤ Θ)		質量	70 kg 以下 分割時の 1 単位 20kg 以下	110kg 以下
交差偏波 識別度 (正面方向)	35 dB 以上		耐風速	瞬間最大 20m/sec 運用可能	瞬間最大 20m/sec 運用可能
偏波	送受直交 2 直線偏波				
VSWR	1.3 以下				
送受減結合 量	80dB 以上				
耐電力	600W(CW)	——			



(a) 車載局の外観



(b) 可搬局の外観

図 3.17 試作したSNGシステム用アンテナ装置

Fig. 3.17 Photographs of antennas for SNG system

3.4.2 円形開口オフセット形カセグレンアンテナの設計

他の設計例として、高能率特性と低交差偏波特性を要求される開口径 4.2m の鏡面修整オフセットカセグレンアンテナの場合を示す。初期値として与えた 2 次曲面鏡系の設計パラメータは次の通りである。

$$D_1=4200\text{mm}, \theta_0=13.7^\circ, \beta=9.8^\circ, \gamma=168.8^\circ, R_0=1714.5\text{mm}, P_0=867.1\text{mm}$$

鏡面修整は、開口の 90% が一様分布で、エッジではレベルを下げるよう鏡面修整を施している。図 3.18 に鏡面修整したオフセットカセグレンアンテナの外形を示す。図 3.19 に鏡面修整前後での開口面分布の計算値を示す。

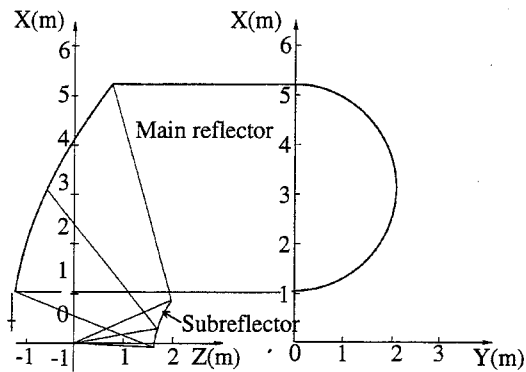


図 3.18 アンテナの構成と開口形状
(円形開口オフセット形カセグレンアンテナ)

Fig. 3.18 Outline of shaped offset Cassegrain antenna with high efficiency

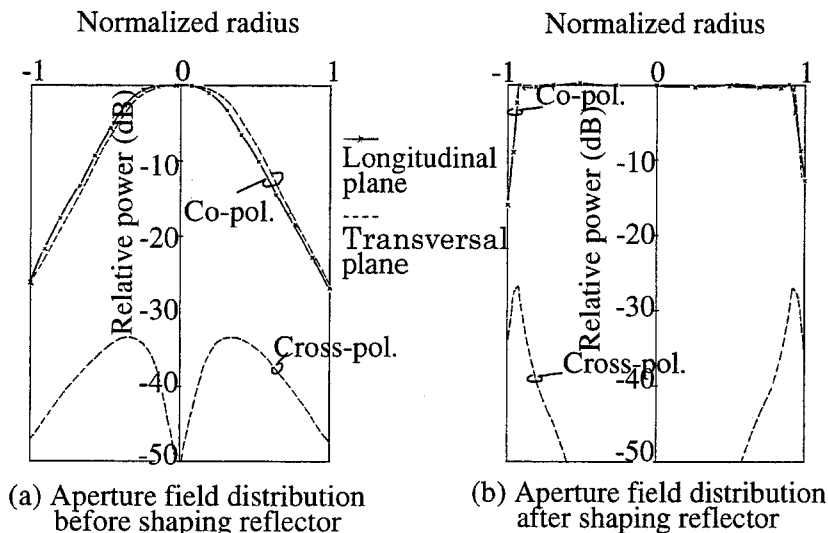


図 3.19 鏡面修整前後の開口分布
(円形開口オフセット形カセグレンアンテナ)

Fig. 3.19 Aperture field distributions before and after shaping dual-reflector antenna (Shaped offset Cassegrain antenna with high efficiency)

周波数は 19.45GHz で、一次放射器は開口径 230mm、長さ 678mm のコルゲート円錐ホーンである。図において、実線は垂直面内の正偏波、破線は水平面内の正偏波および交差偏波の開口面分布を示している。図より、鏡面修整後の交差偏波の開口面分布は鏡面中心部での発生はほとんどなく、正偏波の開口面分布の大きく変化する部分で高くなっていることがわかる。しかし、その面積は小さいので放射パターンへの寄与が小さい。図 3.20(a), (b)に鏡面修整前後の放射パターンの 19.45 GHz での計算値を示す。ここで(a), (b)はそれぞれ鏡面修整前後に対応している。開口能率は 89.4% で、交差偏波成分のピーク値は鏡面修整前には -34dB であったものが修整後は -44dB 以下となっている。

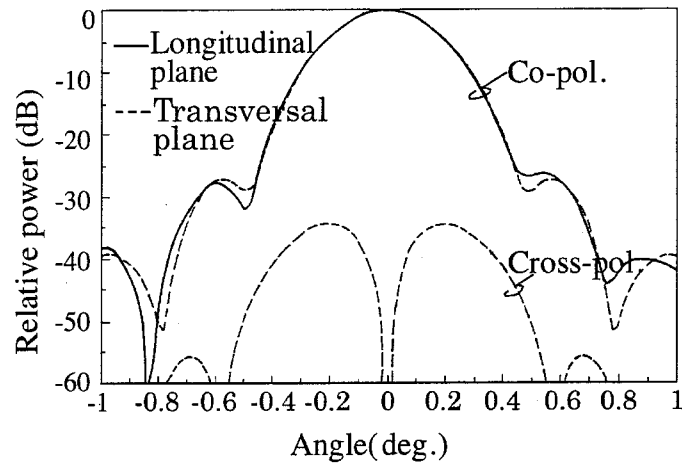


図 3.20(a) 鏡面修整前の放射パターンの計算値
(円形開口オフセット形カセグレンアンテナ)
Fig. 3.20(a) Calculated radiation patterns of shaped offset Cassegrain antenna with high efficiency before shaping reflector

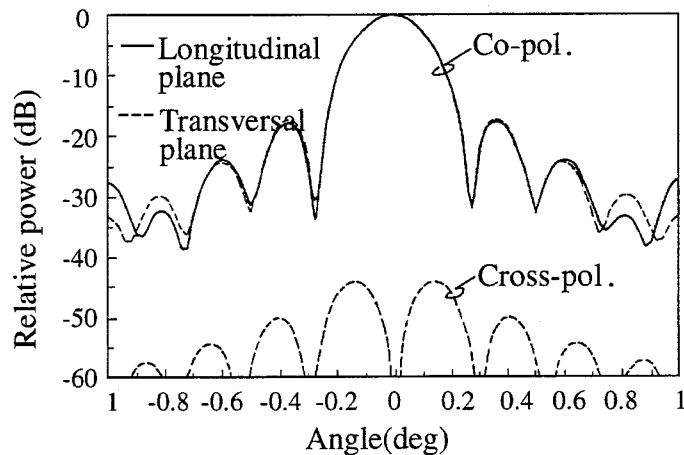


図 3.20(b) 鏡面修整後の放射パターンの計算値
(円形開口オフセット形カセグレンアンテナ)
Fig. 3.20(b) Calculated radiation patterns of shaped offset Cassegrain antenna with high efficiency after shaping reflector

以上の設計例から本設計法により、予め交差偏波消去条件からずらした 2 次曲面鏡系に鏡面修整を施し、高能率を実現しながら、低交差偏波特性を有するアンテナの設計が可能であることが明らかになった。

3.5 むすび

鏡面修整オフセット形複反射鏡アンテナにおいて、機械的条件を満足し、かつ交差偏波成分の発生量が小さい鏡面の形状を容易に求める手法として、鏡面置換法を考案した。これは、機械的条件のほとんどは中心断面の鏡面形状に依存し、また鏡面に起因する交差偏波の発生量は水平面内の鏡面形状に依存することに着目したものである。鏡面置換法により得られた鏡面形状から決まる鏡面パラメータを初期値とする 2 次曲面鏡系に、鏡面修整関数による鏡面修整を施すことにより、低交差偏波特性を有するオフセット形複反射鏡アンテナの設計ができる。この設計法を開口径 $2\text{m} \times 1\text{m}$ の楕円開口オフセットグレゴリアンアンテナおよび開口径 4.2m の円形開口オフセットカセグレンアンテナに適用し、その設計の妥当性を確認した。

第4章 低交差偏波オフセット形 3枚鏡アンテナの設計法

4.1 まえがき

鏡面修整オフセット形複反射鏡アンテナは、これまでに述べたように次のような利点があるため、衛星通信地球局アンテナ、衛星搭載アンテナなどに広く用いられている。

- (1) 鏡面修整により高能率かつ低サイドローブの性能が容易に得られる。
- (2) 1次放射器や副反射鏡によるブロッキングがないため広角にわたって良好なサイドローブ特性が得られる。
- (3) 2枚の反射鏡から発生する交差偏波成分をお互いに打ち消すことができるため、低交差偏波特性が実現できる。

オフセット形複反射鏡アンテナを鏡面修整する場合、図 4.1 に示すように、一般の回転対称形式のように主反射鏡、副反射鏡に修整鏡面を適用すると、アンテナの開口径が大きくなったときアンテナの主反射鏡を構成するアンテナパネルが多種類の修整鏡面となるため、アンテナの製造コストが上昇し経済的に不利となる。

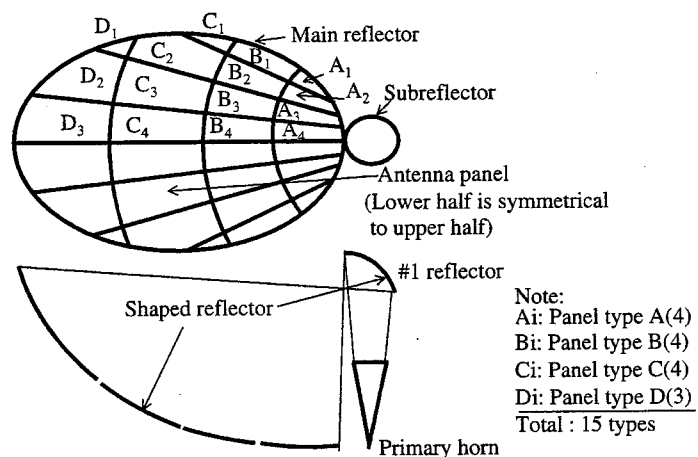


図 4.1 パネル構造の主反射鏡をもつ
オフセット形鏡面修整アンテナ

Fig. 4.1 Offset shaped antenna with a main reflector
composed of panel structure

従って、主反射鏡の製造コストを低減するため、図 4.2 のように主反射鏡を放物面鏡の一部とするオフセットパラボラとし、副反射鏡と1枚の集束反射鏡とで鏡面修整を行う形式のアンテナが考えられる。こうすれば主反射鏡は数種類の放物面鏡のアンテナパネルとなり、アンテナの製造コストの低減がはかれる。高野ら[12]はオフセットパラボラの主反射鏡と鏡面修整された副反射鏡および、集束反射鏡である3枚反射鏡から構成されたオフセットカセグレンアンテナを実用化している。ところがこのアンテナは集束ビーム給電系を構成する集束反射鏡の中心断面がオフセットパラボラの主反射鏡のそれと同一平面上にない、いわゆるダブルオフセット形式であり、必ずしも低交差偏波設計になっていない。

ここでは、集束反射鏡の中心断面がオフセットパラボラの主反射鏡のそれと同一平面上にあるような構成のオフセット形3枚鏡アンテナについての高効率・低交差偏波設計について述べる[50]。すなわち、主反射鏡をオフセットパラボラとし、副反射鏡に相当する1枚の反射鏡(以下#2反射鏡と呼ぶ)と1枚の集束反射鏡(#1反射鏡)から構成される3枚鏡アンテナにおいて、まず所望の開口面分布(ここでは高効率形)を得るための#1反射鏡と#2反射鏡とでの鏡面修整法について述べ、次にこの鏡面修整された鏡面系において低交差偏波性能を得るための低交差偏波設計法について述べる。低交差偏波設計の方法は第3章に示したオフセット形2枚鏡アンテナの設計法を3枚鏡アンテナに適用できるように拡張したものである。

鏡面修整法は第2章の鏡面修整関数を与える方法を用いる。すなわち第2章では副反射鏡に鏡面修整関数を与え、主・副反射鏡を鏡面修整した。それに対

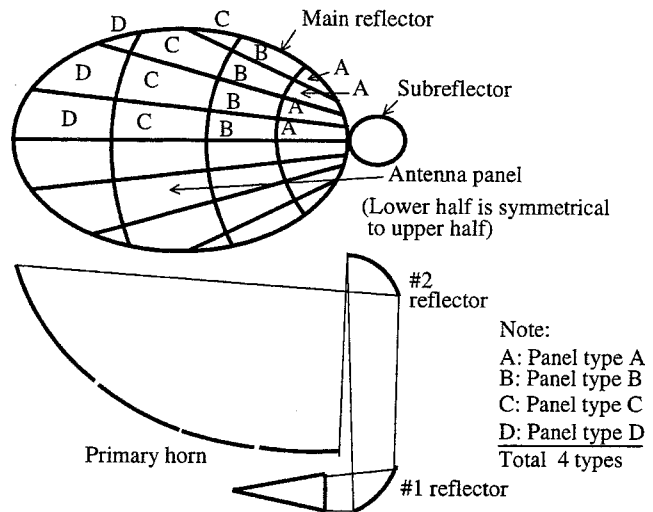


図 4.2 鏡面修整3枚鏡アンテナの構成
(中心断面が同一面内の例)

Fig. 4.2 Configuration of a shaped tri-reflector antenna
(Longitudinal plane is laid in the same plane)

しここでは補助反射鏡に相当する#1 反射鏡に鏡面修整関数を与え、#1、#2 反射鏡を鏡面修整する。この鏡面修整の初期値として#1 反射鏡と#2 反射鏡を回転2次曲面鏡系(以下2次曲面鏡系とする)としている。このときの交差偏波特性は必ずしも低交差偏波性能となっていない。これは、初期値として交差偏波消去条件を満足する2次曲面鏡系を与えたとしても、これを鏡面修整すれば、前章に述べたように修整後の鏡面系での交差偏波特性は修整前にくらべて劣化するので、鏡面修整後に低交差偏波特性を得るためには、初期値として与える鏡面系は交差偏波消去条件からずらす必要があるためである[48]。

このような初期値の選定法を第3章に示した鏡面置換法を拡張して、3枚鏡アンテナに適用する。

4.2節で、3枚鏡アンテナにおいて#1 反射鏡と#2 反射鏡とを、まず初期値として2次曲面鏡系とし、その鏡面系を徐々に修整関数により変形し所望の開口面分布を得るように鏡面修整する鏡面修整法を、4.3節で鏡面修整後に低交差偏波の性能を有する鏡面系を得るような、#1 反射鏡と#2 反射鏡に与える2次曲面鏡系の初期値の選定法を述べる。4.4節ではこの設計法を開口径5.5m(12GHzで250波長相当)のアンテナに適用し、その実測により設計の妥当性を明らかにした[51]。

4.2 鏡面設計法

第3章において示した2枚鏡アンテナの鏡面設計法を拡張し、3枚鏡アンテナの鏡面設計法を示す。図4.3において、主反射鏡は点 F_1 を焦点としZ軸方向を鏡軸とするオフセットパラボラであり、#1 反射鏡および#2 反射鏡は点 F_0 からでた球面波が点 F_1 で収束するように設計された修整鏡面である。図においてXZ面は鏡面系の中心断面に一致し

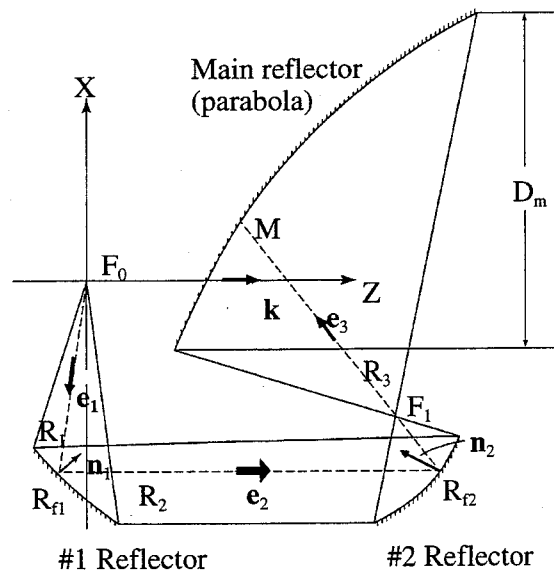


図 4.3 主反射鏡をパラボラとする
 3枚反射鏡アンテナ (中心断面内)
 Fig. 4.3 Offset tri-reflector antenna whose main reflector is of a conventional offset parabola type (Longitudinal plane)

ている。ここで、#1 反射鏡の形状を、点 F_0 を原点とし1次放射器に沿って設けた極座標 (R_1, θ_1, ϕ_1) を用いて次のように関数で与えるものとする。

$$\overrightarrow{F_0 R_{f1}} = R_1(\theta_1, \phi_1) \mathbf{e}_1(\theta_1, \phi_1) \quad (4.1)$$

ここで、 \mathbf{e}_1 は点 F_0 から点 R_{f1} にいたる単位ベクトルである。これより点 R_{f1} における単位法線ベクトル \mathbf{n}_1 は次のようになる。

$$\mathbf{n}_1 = \frac{\frac{\partial(R_1 \mathbf{e}_1)}{\partial \theta_1} \times \frac{\partial(R_1 \mathbf{e}_1)}{\partial \phi_1}}{\left| \frac{\partial(R_1 \mathbf{e}_1)}{\partial \theta_1} \times \frac{\partial(R_1 \mathbf{e}_1)}{\partial \phi_1} \right|} \quad (4.2)$$

従って、 F_0 から出た光線は#1 反射鏡上の点 R_{f1} に入射し、そこで反射され#2 反射鏡に向かうとすると、点 R_{f1} に入射した光線が#1 反射鏡で反射する方向の単位ベクトル \mathbf{e}_2 は次のようになる。

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_1 - 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{n}_1) \quad (4.3)$$

この光線が#2 反射鏡に当たる点を R_{f2} とし点 R_{f1} と点 R_{f2} の距離を R_2 とすると点 R_{f2} (その位置ベクトルを \mathbf{r}_{2w} とする) は次のように表される。

$$\overrightarrow{F_0 R_{f2}} = R_1 \mathbf{e}_1 + R_2 \mathbf{e}_2 = \mathbf{r}_{2w} \quad (4.4)$$

このとき、点 F_0 からでた球面波は点 F_1 で再び収束するための光路長一定の条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} R_1 + R_2 + |\mathbf{b} - \mathbf{r}_{2w}| &= C_5 \text{ (定数)} \\ \mathbf{b} &= \overrightarrow{F_0 F_1} \text{ (定ベクトル)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

式(4.4)を式(4.5)に代入して R_2 について解くと結局次式が得られる。

$$R_2 = \frac{|\mathbf{b}|^2 - C_5^2 - 2R_1 \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{b} + 2C_5 R_1}{2(\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{b} - R_1 \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2 - C_5 + R_1)} \quad (4.6)$$

これより点 R_2 に入射した光線が反射する方向の単位ベクトル \mathbf{e}_3 は次のように表される.

$$\mathbf{e}_3 = \frac{\sigma(\mathbf{b} - \mathbf{r}_{2w})}{|\mathbf{b} - \mathbf{r}_{2w}|} \quad (4.7)$$

なお, σ は F_1 が光線の進行方向にあるとき 1, ないとき -1 である.

これより主反射鏡上の点 M (その位置ベクトルを \mathbf{r}_m とする) は次のように表される.

$$\overline{F_0 M} = R_1 \mathbf{e}_1 + R_2 \mathbf{e}_2 + R_3 \mathbf{e}_3 = \mathbf{r}_m \quad (4.8)$$

ここで, R_3 は点 R_2 と点 M との距離である.

このとき, 光路長一定の条件は次となる.

$$R_1 + R_2 + R_3 - \mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k} = C_6 \text{ (定数)} \quad (4.9)$$

ここで, \mathbf{k} は鏡軸 Z 方向の単位ベクトルである.

これより R_3 は次のようになる.

$$R_3 = \frac{C_6 - R_1(1 - \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{k}) - R_2(1 - \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k})}{1 - \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{k}} \quad (4.10)$$

以上のように, 1次放射器の焦点位置 F_0 , 主反射鏡の焦点位置 F_1 および #1 反射鏡の形状 R_1 を与えれば #2 反射鏡の形状は光路長一定の条件から一義的に決まり, 更に主反射鏡の鏡軸方向が Z 軸方向と決まっているので, 同じく主反射鏡の形状が決まる. 一方, 開口面分布も #1 反射鏡の形状に依存することになる. 従って, #1 反射鏡の形状の決め方が問題となる. ここでは #1 反射鏡の初期値

を2次曲面鏡で与え、これを修整関数を用いて徐々に変形し、所望の開口面分布を得る第2章の鏡面修整法[47]を用いる。

すなわち、#1反射鏡の形状 R_1 を次式で与える。

$$R_1(\theta_1, \phi_1) = r_0(\theta_1, \phi_1) + \sum_i f_i(\theta_1, \phi_1) \quad (4.11)$$

ここで、 $r_0(\theta_1, \phi_1)$ は基準の2次曲面鏡で式(2.9)で与えられ、 $f_i(\theta_1, \phi_1)$ は鏡面修整関数である。

4.3 鏡面置き換え法の3枚系への適用

図4.4に2次曲面鏡系からなるオフセット形3枚鏡アンテナの設計パラメータを示す。図において#1反射鏡は F_0, F' を焦点とする2次曲面鏡、#2反射鏡は点 F' , F_1 を焦点とする2次曲面鏡、主反射鏡は点 F_1 を焦点とし Z 軸方向を鏡軸とする放物面鏡である。

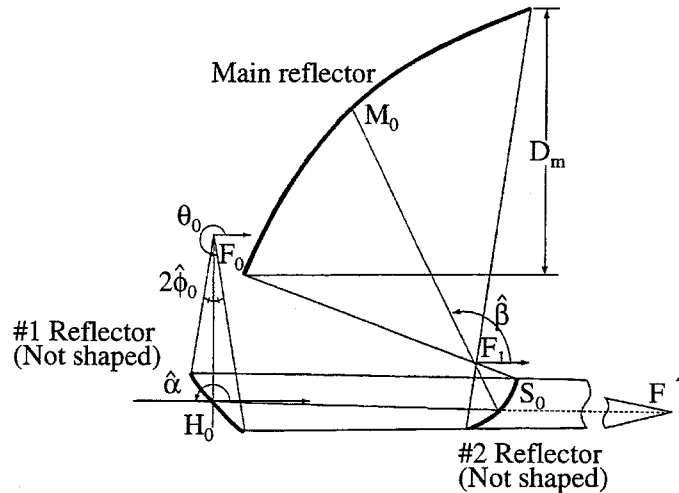


図 4.4 2次曲面鏡よりなる3枚反射鏡アンテナの設計パラメータ (中心断面内)

Fig. 4.4 Design parameters of an offset tri-reflector antenna composed of reflectors of quadric surface of revolution (Longitudinal plane)

また、点 F_0 から1次放射器の中心軸に沿ってでた光線が各反射鏡に当たる点をそれぞれ H_0, S_0, M_0 とする。このとき、このアンテナの自由度のある設計パラメータは9個であり、次の値を選ぶ。

D_m : 主反射鏡の開口径

$2\hat{\phi}_0$: 点 F_0 から #1 反射鏡の周辺を見込む角(全角)

$\hat{\gamma}$: $\overrightarrow{F_0H_0}$ と Z 軸とのなす角

α : $\overrightarrow{F'S_0}$ と Z 軸とのなす角

β : $\overrightarrow{S_0F_1}$ と Z 軸とのなす角

$$S_1 = |\overrightarrow{F_0H_0}|$$

$$S_2 = |\overrightarrow{F'H_0}|$$

$$S_3 = |\overrightarrow{F'S_0}|$$

$$S_4 = |\overrightarrow{S_0F_1}|$$

一方, 図 4.4 のオフセット形 3 枚鏡アンテナの交差偏波消去条件は, #1 反射鏡, #2 反射鏡のそれぞれの離心率を e_{m1} , e_{m2} とすれば, 次式で表される[59].

$$e_{m2}^2 - 1 = \frac{4 \sin \frac{\hat{\beta} - \xi_0}{2} \sin \frac{\hat{\alpha} - \xi_0}{2} \sin \frac{\hat{\beta}}{2} \sin \frac{\hat{\alpha}}{2}}{\sin^2 \frac{\hat{\alpha} + \hat{\beta} - \xi_0}{2}} \quad (4.13a)$$

$$\tan \frac{\xi_0 - \hat{\alpha}}{2} = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \tan \frac{\hat{\gamma} - \hat{\alpha}}{2} \quad (4.13b)$$

$$e_{m1}^2 - 1 = \frac{4S_1S_2}{(S_1 + S_2)^2} \sin^2 \left(\frac{\hat{\gamma} - \hat{\alpha}}{2} \right) \quad (4.13c)$$

以上の式は 2 次曲面鏡系に適用されるが, 第 3 章の手法をもとに, 鏡面修整された鏡面系を有する 3 枚鏡アンテナに適用できるよう新しい手法を開発した.

これは第3章でも述べたように、鏡面の非対称に起因する交差偏波の発生量が図4.5に示すオフセット鏡面系の中心断面に直交する水平面の鏡面の曲率に依存することに着目し、便宜上オフセット鏡面系の中心の水平面の曲率と等しい曲率を有する回転対称2次曲面鏡系に置換し、それに鏡面修整を施し、その修整鏡面を回転対称2次曲面鏡群で展開し、その中の鏡面中心部の鏡面パラメータを上記交差偏波消去条件にあてはめるものである。この手法を用いて、以下に述べるように鏡面修整後、交差偏波特性のよい鏡面系の初期値を決定する。ここで設計するオフセット形3枚鏡アンテナの基本構成は図4.6に示す交差偏波消去系である。この系において、#1反射鏡、#2反射鏡はそれぞれ楕円鏡、双曲面鏡である。

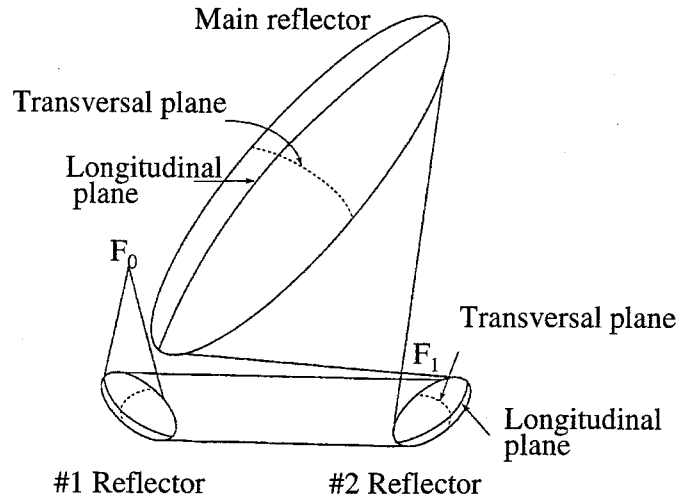


図 4.5 面系の中心断面と水平面

Fig. 4.5 Longitudinal plane and transversal plane of an offset tri-reflector antenna

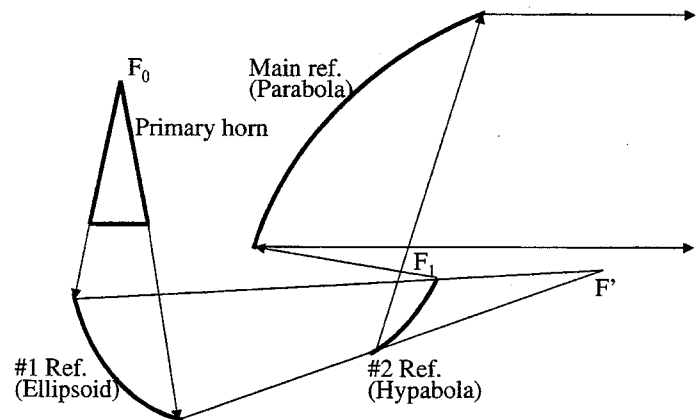


図 4.6 本設計での3枚反射鏡アンテナの基本構成

Fig. 4.6 Fundamental scheme of the tri-reflector antenna

以下に鏡面修整後、交差偏波特性のよい鏡面系を設計するための、4.2節に示した鏡面修整法の初期値の決定法を示す。この方法を第3章と同じく鏡面置換法と呼ぶ。

- (1) 基準として与えた2次曲面鏡系からなるオフセット形3枚鏡系（鏡面系Aとする）の中心の水平面内の鏡面の形状を回転対称2次曲面鏡系

(鏡面系Bとする)に置き換える. 図4.7はその置き換えの概念図を示す. 図4.8は鏡面系Bの詳細図である.

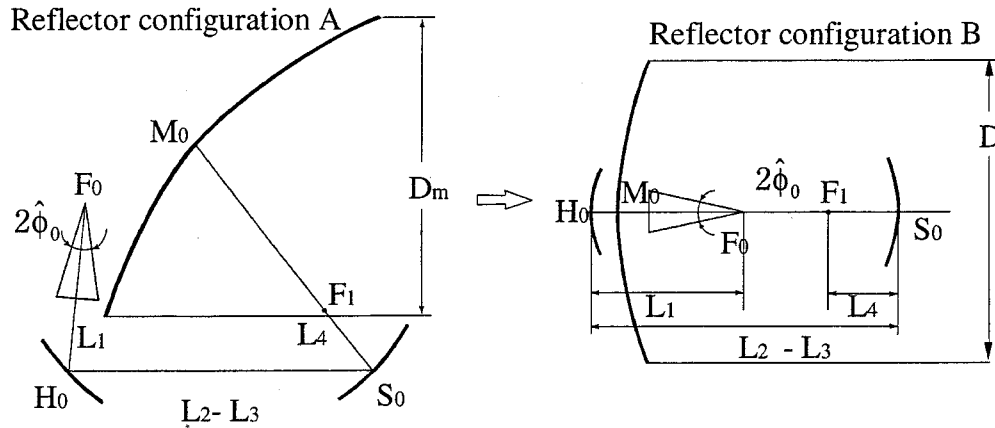


図 4.7 鏡面系AからBへの置き換え

Fig. 4.7 Transformation from reflector configuration A to B

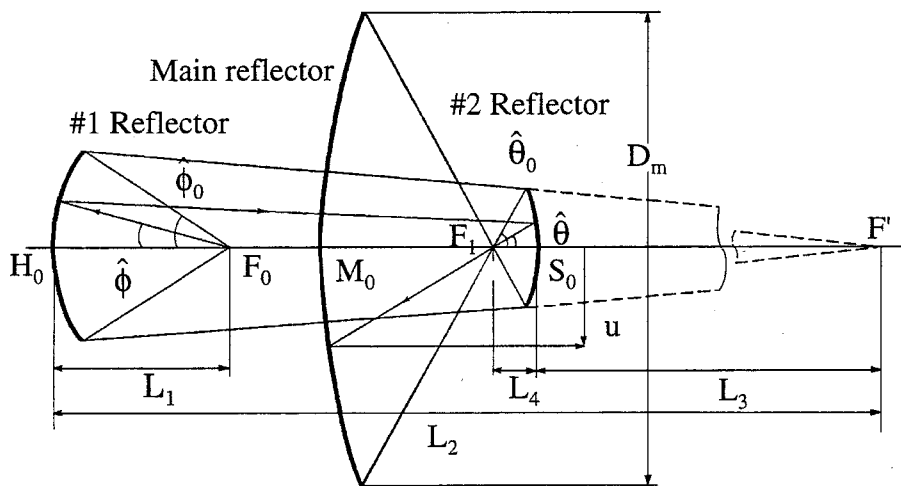


図 4.8 3枚反射鏡系 (鏡面系B)

Fig.4.8 Tri-reflector antenna (Reflector configuration B)

- (2) (1)で決めた回転対称2次曲面鏡系を，所望の開口面分布となるよう，この鏡面を以下の方法で鏡面修整し，鏡面中心部の回転対称2次曲面鏡系(鏡面系Cとする)を求める．すなわち，次の微分方程式を解くことにより修整鏡面を鏡面定数が異なる回転対称2次曲面鏡群に展開する．(付録Aに導出を示す．)

$$\frac{d\hat{P}_1}{d\hat{\phi}} = f(\hat{P}_1, \hat{\phi}) \quad (4.14a)$$

$$f(\hat{P}_1, \hat{\phi}) = 4 \tan \frac{\hat{\theta}}{2} \tan \frac{\hat{\phi}}{2} \frac{C(\hat{\phi})(C_5 e_1 - h)}{t_p (C_5 \alpha_n - h \alpha_p)(1 + e_1)} \hat{P}_1 \quad (4.14b)$$

$$C(\hat{\phi}) = \frac{1}{2} \left\{ \cot \frac{\hat{\theta}}{2} \frac{d(\tan \frac{\hat{\theta}}{2})}{d\hat{\phi}} - \frac{1}{\sin \hat{\phi}} \right\} \quad (4.14c)$$

$$\alpha_n = \tan \frac{\hat{\theta}}{2} - \cot \frac{\hat{\phi}}{2}, \alpha_p = \tan \frac{\hat{\theta}}{2} + \cot \frac{\hat{\phi}}{2} \quad (4.14d)$$

$$e_1 = -\frac{(C_5 v_p - h v_n) - 2P_1 v_p}{(C_5 v_n - h v_p) - 2P_1 v_p} \quad (4.14e)$$

$$v_n = \tan \frac{\hat{\theta}}{2} - \tan \frac{\hat{\phi}}{2}, v_p = \tan \frac{\hat{\theta}}{2} + \tan \frac{\hat{\phi}}{2} \quad (4.14f)$$

$$h = \frac{2e_{20}}{1+e_{20}}(L_3 - L_2) + \frac{2(e_{10} - e_{20})}{(1-e_{10})(1+e_{20})}L_1 \quad (4.14g)$$

$$\tan \frac{\hat{\theta}}{2} = \tan \frac{\hat{\theta}_0}{2} \sqrt{\frac{1 - \cos^{m+1} \hat{\phi}}{1 - \cos^{m+1} \hat{\phi}_0}} \quad (4.14h)$$

定数と一致することになる．すなわち， L_1 は次のようになる．

$$L_1 = \hat{P}_1(\hat{\phi} = \hat{\phi}_0) \quad (4.16)$$

- (3) (2)で求めた回転対称2次曲面鏡系群で $\hat{\phi} = 0$ としたときの \hat{P}_1 および回転対称2次曲面鏡系の定数を求める．これが鏡面系Cとなる．ここで， Q_1 を次のように定義する．

$$Q_1 = \hat{P}_1(\hat{\phi} = 0) \quad (4.17)$$

- (4) (3)で得た回転対称2次曲面鏡系の定数 e_1 ， e_2 が交差偏波消去条件式(4.13)を満足していれば，(1)で与えた鏡面系Aを4.2節の初期値 r_0 とする．ここで，鏡面系のパラメータは表4.1の鏡面系Dである．また，満足していなければ鏡面系Aのパラメータを変え，手順(1)にもどり上記の方法を繰り返す．

なお，鏡面系A→B→C→Dの置き換えは表4.1に示すように次の条件で行う．

表 4.1 鏡面系A,B,C,Dのパラメータ

Table 4.1 Parameters of reflector configuration A, B, C and D

Parameter (Fig. 4.4)	Reflector Configuration			
	A	B	C	D
D_m	D_m	D_m	D_m	D_m
$\hat{\phi}_m$	$\hat{\phi}_m$	$\hat{\phi}_m$	$\hat{\phi}_m$	$\hat{\phi}_m$
$\hat{\gamma}$	$\hat{\gamma}$	π	π	$\hat{\gamma}$
$\hat{\alpha}$	$\hat{\alpha}$	0	0	$\hat{\alpha}$
$\hat{\beta}$	$\hat{\beta}$	π	π	$\hat{\beta}$
S_1	L_1	L_1	Q_1	Q_1
S_2	L_2	L_2	Q_2	Q_2
S_3	L_3	L_3	Q_3	Q_3
S_4	L_4	L_4	Q_4	Q_4

- (1) 各鏡面系A, B, C, Dにおいて D_m ， $\hat{\phi}_m$ は変えない．
 (2) 鏡面系A→Bの置き換えにおいては S_1 ， S_2 ， S_3 ， S_4 は変えない．

(3) 鏡面系 B→C の置き換えにおいては, $\hat{\theta}_0, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$ は変えない.

(4) 鏡面系 C→D の置き換えにおいては Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 は変えない.

この方法の特徴は次の点にある. すなわち, アンテナの設計手順として, まずアンテナの機械的要求条件, 例えばアンテナ全体の高さ・広がり, 主反射鏡, #1・#2 反射鏡の寸法などの制約条件を満足するような2次曲面鏡系を決める. 従来の設計法では, この系を初期値として, 鏡面を変形し, 機械的要求条件と高能率, 低サイドローブ特性, 低交差偏波特性など電気的要求を満足するまで, 鏡面修整と電流分布法による放射パターン計算を繰り返すことになる. しかし, ここで開発した方法では, 機械的要求条件を満足するように, 本手法により低交差偏波特性を得る鏡面系を決め, 最終的に得られた鏡面系にのみ電流分布法を適用し, 放射パターンを計算する. 従って, 放射パターン計算の繰り返す必要がない. 更に, この設計手法は, 鏡面系の外周($\hat{\phi} = \hat{\phi}_0$ に対応)を基準に鏡面修整するため, 機械的条件と整合がとれた設計が容易にできるという利点を有している.

4.4 低交差偏波オフセット形 3枚鏡アンテナの設計と実測結果

上記設計手法により設計した開口径 5.5m(12GHz で 250 波長相当)のパラボラを主反射鏡とし, それぞれ有効開口径 1.1m(同 44 波長相当)の #1 反射鏡, #2 反射鏡の 2 枚の修整反射鏡からなる 3 枚鏡アンテナの形状, およびアンテナ装置としての外観図をそれぞれ図 4.10, 図 4.11 に示す.

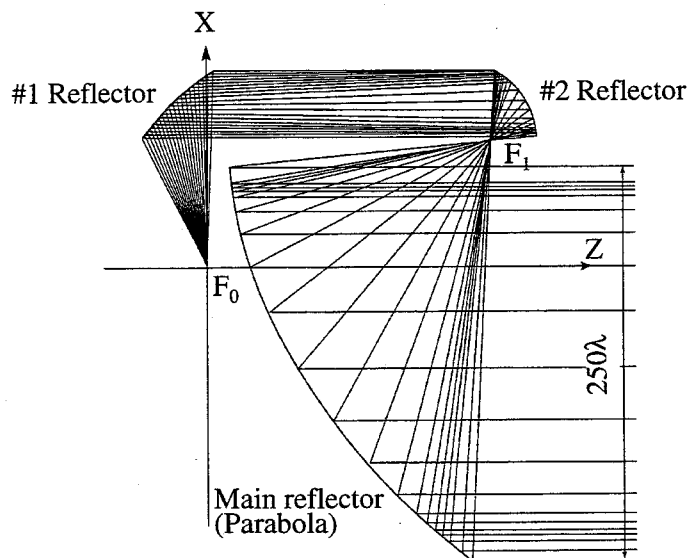


図 4.10 設計した3枚反射鏡アンテナ

Fig. 4.10 Designed offset tri-reflector antenna

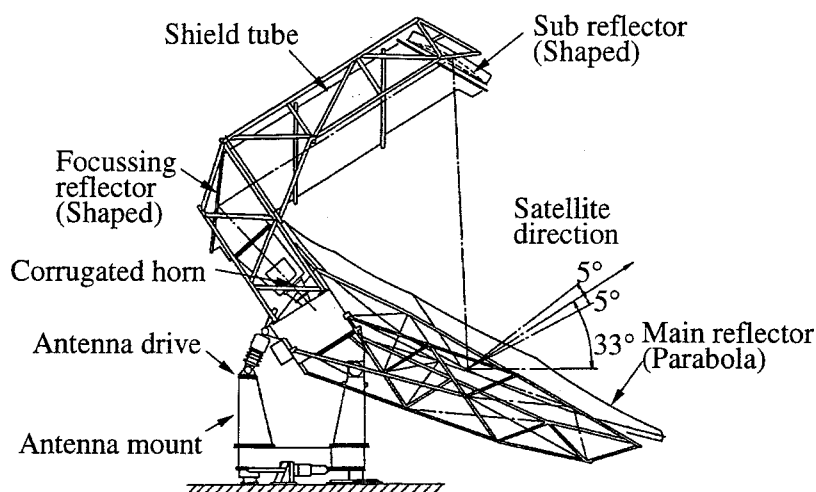


図 4.11 オフセット形3枚鏡アンテナ装置の外観（開口径5.5m）
Fig. 4.11 Outline of an offset tri-reflector antenna (Dia. 5.5m)

このアンテナの1次放射器は#1 反射鏡のエッジレベル約 -27dB を吹き付けるコルゲート円錐ホーンである。開口面分布として、開口の85%を一様分布とし、周縁で急峻にテーパを持たせたシャープロールオフ分布とした高能率形となるよう#1 反射鏡、#2 反射鏡を鏡面修整している。図 4.12 にこのアンテナの開口面分布の計算値を示す。

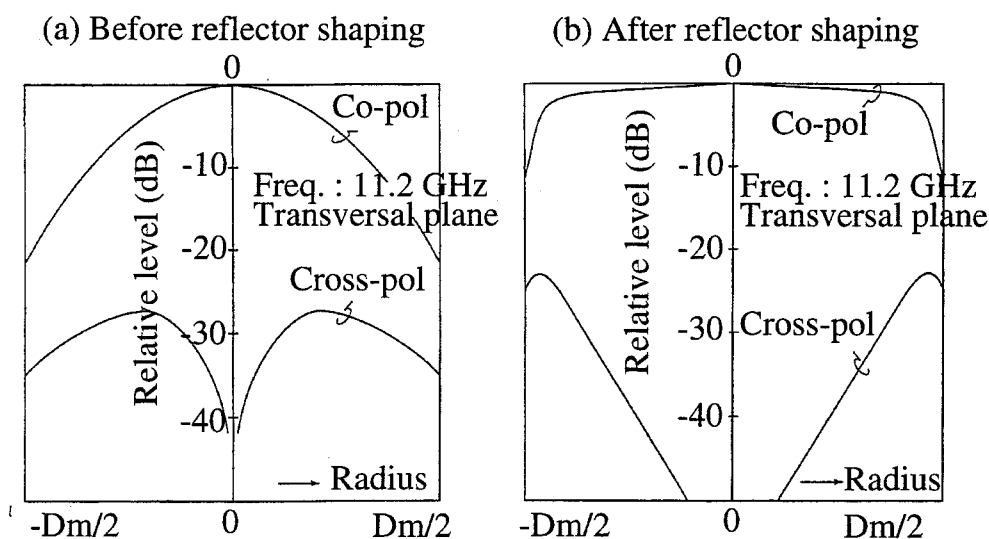


図 4.12 開口分布計算値（水平面内）
Fig. 4.12 Calculated aperture field distribution (Transversal plane)

この開口能率は表 4.2 に示すとおり約 75% の高能率を得ている。また、図 4.12 には鏡面修整前の開口面分布を比較のために示しており、鏡面修整の効果がよくわかる。ここで鏡面修整前とは鏡面系 A に相当する鏡面系に対応している。なお、開口周縁に見られる高い交差偏波成分は開口の 85% を一様分布にしたためその周縁部分で鏡面形状が急激に変化していることが原因である。図 4.13 に近軸放射パターンの計算値を示す。

表 4.2 開口能率計算値

Table 4.2 Calculated antenna aperture efficiency

	11.2 GHz
Loss of primary horn	-0.10 dB
Aperture distribution	-0.50
Spill over power	-0.55
Surface error	-0.12
Setting error	-0.02
Aperture efficiency	-1.29 dB 75%

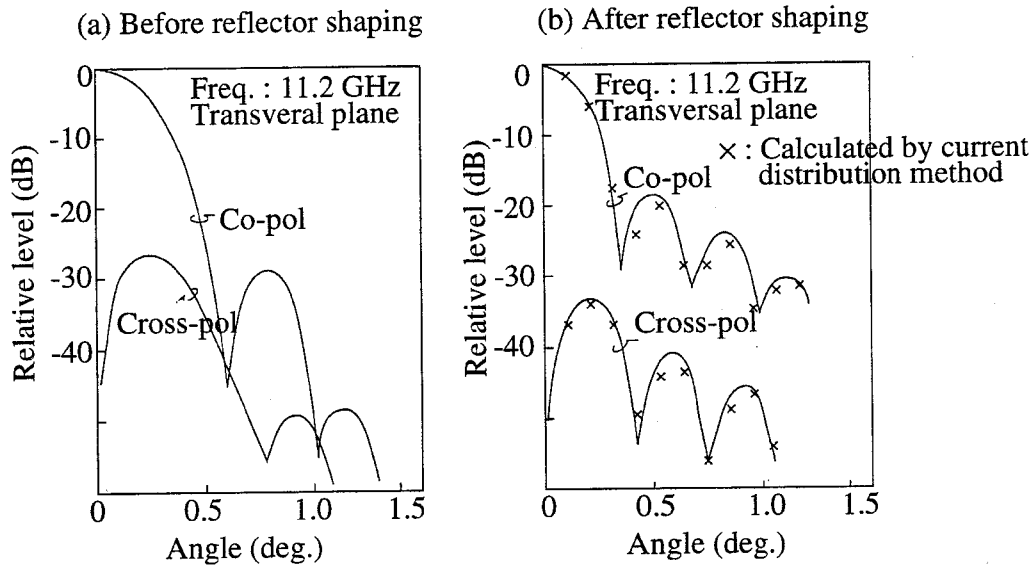


図 4.13 近軸放射パターン計算値 (水平面内)

Fig.4.13 Calculated near-axis radiation patterns (Horizontal plane)

図より鏡面修整前での交差偏波成分のピーク値 -26dB が鏡面修整後、 -33dB と大幅に改善されていることがわかる。図 4.13 に、オフセット形 3 枚鏡アンテナを構成する #1 反射鏡、#2 反射鏡、主反射鏡のそれぞれの反射鏡からの放射パターンを電流分布法により数値計算した結果を比較のために示す。その結果、交差偏波成分のピーク値はいずれも -33dB とよく一致している。

更に、試作した開口径 5.5m の 14/12GHz 帯のインテルサット対応地球局アンテナの実測性能として、表 4.3 に開口能率を含む主要性能・諸元を、図 4.14(a), (b) に近軸放射パターンを、図 4.15 に広角サイドローブ特性を示す。

表 4.3 オフセット形3枚鏡アンテナの主要性能・諸元
Table 4.3 Major performance of an offset tri-reflector antenna

電気的主要性能			機械的主要性能	
	送信帯	受信帯	アンテナ方式	オフセット グレゴリアンアンテナ
周波数	14.0 - 14.5 GHz	10.95 - 11.7 GHz	開口径	直径 5.5m 相当
利得	56.7 dBi	54.7 dBi	マウント方式	AZ/EL マウント
開口能率	73%	73%	追尾方式	ステップトラック 方式（電動）
雑音温度 (EL=28°)	————	34K 以下	駆動範囲	AZ : ±7° EL : 28 - 38°
サイドローブ 特性	27-25 log Θ, dBi (1° ≤ Θ ≤ 63°) -18 dBi (63° ≤ Θ)		追尾精度	平均風速 13m/sec にて 0.04° rms 以下
			駆動角速度	AZ, EL とも 0.002 - 0.004° /sec
交差偏波 識別度 (追尾範囲内)	32.5 dB 以上	39.1 dB 以上	耐風速	運用可能： 平均風速 25 m/sec 以上 非破壊： 最大瞬間風速 70 m/sec 以上
偏 波	送受直交 2 直線偏波			
VSWR	1.2 以下			
送受減結合量	85 dB 以上			
耐電力	600W (CW)	————		

ここで、測定はアンテナのニアフィールド領域(電波視準塔アンテナとの距離は 1600m)で行っているため、交差偏波成分のピーク値は計算値で -31dB となっているが、実測値と計算値はよく一致している。また、広角サイドローブ特性については、低サイドローブ特性が実現しており、CCIR 勧告値より良好な $27 - 25 \log \Theta$, dBi ($1^\circ \leq \Theta \leq 63^\circ$), -18dBi ($63^\circ \leq \Theta$) を十分満足していることがわかる。

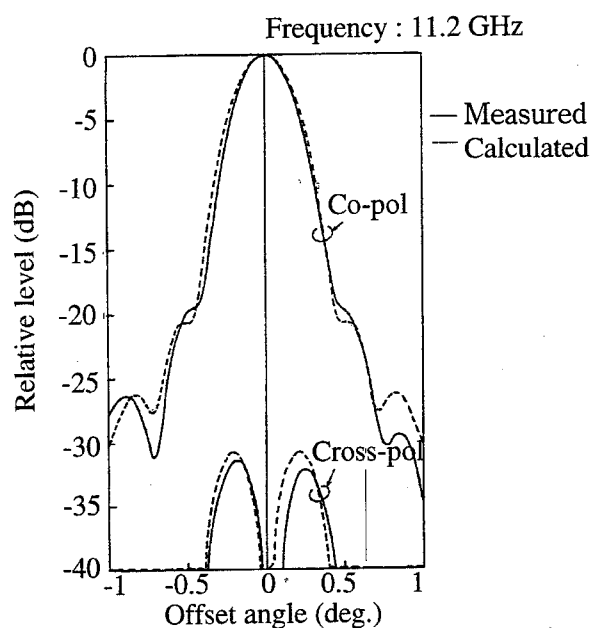


図 4.14(a) 近軸放射パターン
(測定スパン:1600km)
(計算値と実測値との比較)
Fig. 4.14(a) Near-axis radiation pattern
(Measure span:1600km)
(Comparison between
calculated and measured
values)

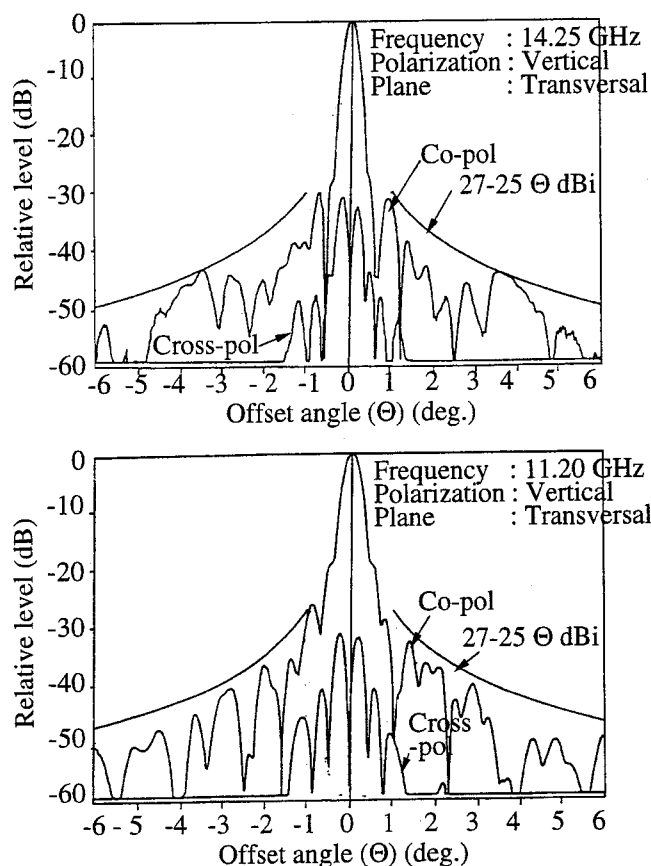


図 4.14(b) 近軸放射パターンの実測値
Fig. 4.14(b) Measured near-axis radiation patterns

なお、3枚鏡アンテナを、通常の交差偏波消去系として設計すると開口能率52%、交差偏波成分のピーク値 -34dB となる。また、この交差偏波消去系を従来の鏡面修整法[17]で設計すれば交差偏波成分のピーク値は -26dB まで劣化する。このことから、本設計法の有効性があきらかである。

以上により、本論文で示した幾何光学的手法による高能率・低交差偏波特性を有する鏡面系の設計法の妥当性が確認できた。

4.5 むすび

オフセットパラボラである主反射鏡と2枚の修整反射鏡よりなるオフセット形3枚鏡アンテナにおいて低サイドローブ特性を実現しつつ、高能率・低交差偏波特性を有するアンテナを設計する手法を示した。この方法は、鏡面修整に関しては鏡面修整関数を用いて2枚の集束反射鏡を鏡面修整する方法を用い、更に、このときその鏡面修整の初期値として、鏡面修整しても低交差偏波特性を得るような鏡面系を選んでいる。その初期値として与える鏡面系を決める方法として、鏡面系置換法を考案した。この設計法を開口径5.5m(12GHzで250波長相当)の3枚鏡アンテナに適用し、その設計の妥当性を実測により確認した。このアンテナは14/12GHz帯のインテルサット対応地球局アンテナであり、開口能率73%、交差偏波成分のピーク値 -33dB 以下、サイドローブ特性 $27-25\log\Theta$, dBi ($1^\circ \leq \Theta \leq 63^\circ$), -18dBi ($63^\circ \leq \Theta$) 以下の性能を得ている。このアンテナ設計法は低コストで、高能率で交差偏波特性の優れた性能を実現できるため、比較的大型の衛星通信地球局アンテナなどの設計に有効である。

第5章

低サイドローブオフセット形 複反射鏡アンテナの設計法

5.1 まえがき

衛星搭載アンテナや衛星通信地球局アンテナに用いられる反射鏡アンテナに対する要求として、楕円ビーム化がある。楕円開口を有するオフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整設計法として、前章までに副反射鏡の形状を関数で与え、その副反射鏡の形状を基に開口で平面波を実現するよう主反射鏡の形状を求める方法を述べてきた。すなわち、副反射鏡の初期値を回転2次曲面鏡とし、その初期値に各種の修整関数を加え修整鏡面とする。その副反射鏡に対応して、光路長一定の法則により主反射鏡の鏡面を決める方法である。この設計法では、副反射鏡からの放射パターンの計算に幾何光学的手法を、主反射鏡からの放射パターンの計算に電流分布法を適用している。この方法は1回の2重積分を主反射鏡に適用し電流分布法により放射パターンを計算するので、2重積分を主、副反射鏡の2枚の反射鏡にそれぞれ適用し電流分布法で放射パターンを計算する方法に比べ、所要機械計算時間の点で有利である。

楕円ビームを要求する衛星搭載アンテナとして、放送衛星用アンテナがある。このアンテナの場合、サイドローブ、交差偏波レベルに関して WARC-BS でアンテナの設計目標が規定されており、特にサイドローブに関しては図5.1に示す

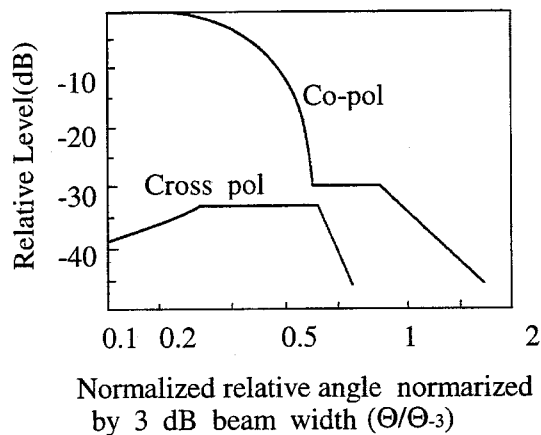


図 5.1 要求放射パターン

Fig. 5.1 Required radiation patterns

-30dB のコンターについても規定されている．このような低サイドローブレベルのアンテナを上記鏡面修整法により設計，製作した結果，所望のサイドローブ特性が得られなかった．このようにいったんアンテナを製作した後で，サイドローブ特性が所要値を満たしていないことが判明した場合の，サイドローブ特性の改善方法に関してほとんど研究されていない．ここでは，鏡面分割構成法によるサイドローブ特性の改善方法[52]を研究する．すなわち，鏡面をいくつかの部分に分割し，それぞれの相対位置を変えることにより，開口面上の位相分布を制御する手法によりサイドローブ特性を改善する．この方法を開口径 $1.3\text{m} \times 2.8\text{m}$ の楕円開口のオフセット形複反射鏡アンテナに適用し，その妥当性を確認した．この方法は第2章の鏡面修整法の変形といえ，実験的に鏡面修整量を求めていくという点に特徴がある．

ここでは，一例として前述の鏡面修整法により設計・製作した場合を取り上げた．しかしながら，一般に設計法の誤差，製作精度，設定精度などにより，アンテナを製作後サイドローブ特性が所望値を満足していないことが判明する場合があります，このような場合のサイドローブ特性の改善に本方法が有効である．

5.2 節に幾何光学的手法による鏡面設計法とその設計に基づき試作したオフセット楕円ビームアンテナのサイドローブ特性の測定結果を示す．5.3 節にそのサイドローブ特性の改善のため，新たに考案した鏡面分割構成によるサイドローブ抑圧法とその効果を述べる．

5.2 鏡面設計法

5.2.1 目標性能

想定した放送衛星搭載用アンテナの目標性能を表5.1に示す．このうち，特に厳しいと考えられるのはサイドローブレベル，ビーム幅および交差偏波の項目である．特にサイドローブレベ

表5.1 アンテナの目標性能
Table 5.1 Design objectives of the antenna

項 目	目標性能
周波数	11.7～12.1GHz
偏波	左旋円偏波
3dB ビーム幅	$1.62^\circ \times 0.72^\circ \pm 0.05$ (11.9GHz)
利得	43.9dB 以上
交差偏波レベル	-33dB 以下 (図 5.1)
サイドローブレベル	-30dB 以下 (図 5.1)
主反射鏡の大きさ	3m 以下

ルに関しては -30dB のコンターのカバレッジ形状についても規定されている。そこでこの3項目に重点をおいて設計を行った。

5.2.2 設計方針

(1) サイドローブレベル

主・副反射鏡系に鏡面修整を行い、所望のサイドローブレベルを得る鏡面修整法として、第2章の鏡面修整法を用いる。まず基準の形状となる2次曲面鏡系を選定し、次に副反射鏡の形状 $R_s(\theta, \phi)$ を2次曲面鏡を表す関数に各種の鏡面修整関数を与えて変形させ、これに対応して光路長一定の条件から主反射鏡の形状を決定する。

この鏡面修整関数として開口の形状を変える関数と開口面上の電界分布を変える関数がある。開口の形状を変える関数としては、第2章の次の2つを用いる。

$$f_1(\theta, \phi) = x_1 t^2 (1 - \cos 2\phi) \quad (5.1)$$

$$f_2(\theta, \phi) = x_2 t^3 (\cos \phi - \cos 3\phi) \quad (5.2)$$

また、開口の電界分布を変える関数としては、やはり第2章の

$$f_3(\theta, \phi) = x_3 t (1 - t^2)^3 \cos \phi \quad (5.3)$$

$$f_4(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^M y_j G_{p(j)}(\theta) H_{q(j)}(\phi) \quad (5.4)$$

とし、径方向の分布を決める関数 G_p は第2章と同じ関数とするが、周方向の分布を H_q として第2章の5つの関数に加え、次の3つの関数を用いる。

$$H_6(\phi) = \cos \phi - \cos 3\phi \quad (5.5)$$

$$H_7(\phi)=1-\cos\phi \quad (5.6)$$

$$H_8(\phi)=1+\cos\phi \quad (5.7)$$

所望のサイドローブを得るためには上記関数を適当に選定することにより開口面分布を、次式で与えられる図 5.2 の Inflected Bessel 分布に近づけることにより実現する。

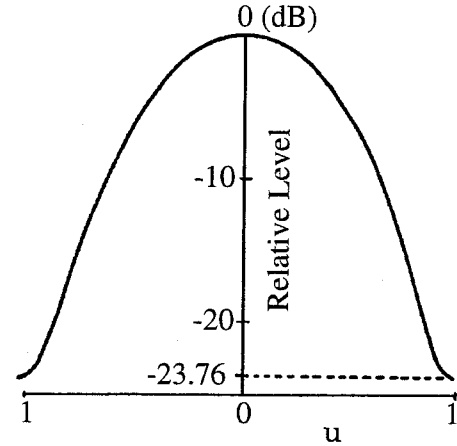


図 5.2 Inflected Bessel 分布
 Fig. 5.2 Inflected Bessel distribution

$$A(u)=\frac{1}{3}+\frac{2}{3}J_0(3.8u) \quad (5.8)$$

ここで、 $J_0(3.8u)$ は 0 次の第一種ベッセル関数、 u は開口中心から開口エッジまでの距離を正規化した値である。式(5.8)の開口面分布による理論サイドローブレベル(理想値)は-47dB 以下になる。

また、円偏波を用いる場合に生ずる水平面内の放射パターンの左右の非対称性は楕円ビームアンテナでの交差偏波消去条件を満足させることにより小さくできる。オフセット楕円ビームアンテナでの交差偏波消去については第3章の方法を用いる。

以上より、オフセット楕円ビームアンテナのサイドローブレベルは以下のように求めることになる。すなわち、まず鏡面修整後交差偏波消去条件を満足する基準となる2次曲面鏡系を与え、次に Inflected Bessel 分布を得るようにその2次曲面鏡系を鏡面修整する。得られた修整鏡面系で副反射鏡からの放射パターンを幾何光学的に求め、ついで主反射鏡からの放射パターンを電流分布法で計算する。

(2) ビーム幅

式(5.8)の開口面分布によるとビーム幅 Θ_3 は、開口径を D とすると

$$\Theta_3 = 80 \lambda / D_m \quad (\text{deg ree}) \quad (5.9)$$

で表せることから、近似的に開口径 D_1 , D_2 を選ぶ. 最終的には開口径を決める鏡面修整により開口径を決め、放射パターンを計算し所望の値を得るようにする.

(3) 交差偏波

円偏波を用いるため、鏡面系からの交差偏波の発生はなく、主に給電系からの交差偏波の発生を考慮する. そこで一次放射器には交差偏波特性の良好なコルゲート円錐ホーンを用いる.

5.2.3 試作したアンテナ

前節に示した方針に基づき設計・試作したアンテナ鏡面系の構成を図 5.3 に示す. 主反射鏡開口の形状は $1.3\text{m} \times 2.8\text{m}$ のほぼ楕円形, 副反射鏡の形状は一次放射器側から見ると中心断面が凹, それに直交する面内で凸の鞍形となっている. このアンテナの縦断面内および横断面内の放射パターンの計算値を図 5.4 に示す. この図の通り, アンテナのサイドローブ特性は表 5.1 の目標性能である -30dB 以下を満足している.

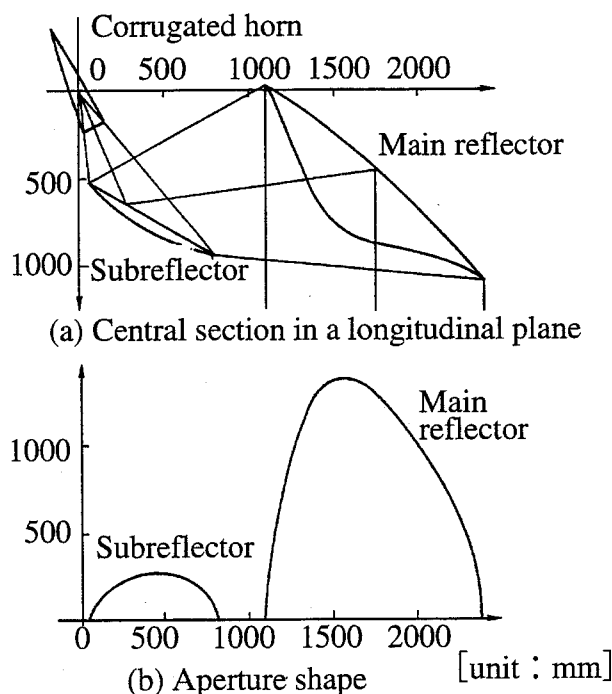


図 5.3 アンテナ外形

Fig. 5.3 Peripheral shape of a designed antenna

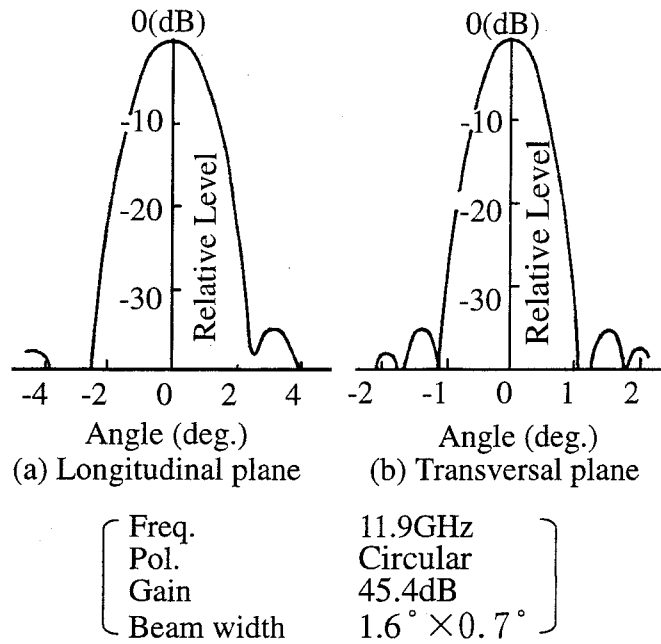


図 5.4 放射パターン計算値

Fig. 5.4 Calculated radiation patterns

5.2.4 測定

図 5.5 にこのアンテナの放射パターン測定値のコンターマップを示す。図より-30dB のコンターに対する目標値が満足されていないことがわかる。これは設計の際、副反射鏡からの放射パターンを幾何光学で設計したためである。更に、与えた鏡面修整関数の制約のためどうしても主反射鏡の周辺が副反射鏡からの放射パ

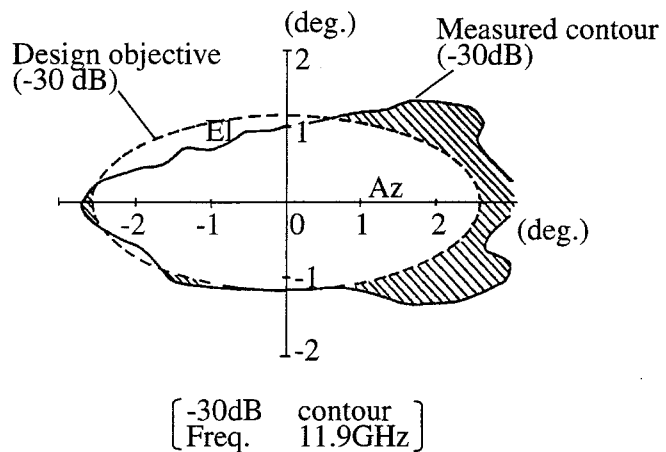


図 5.5 放射パターン実測値
(-30dBコンターマップ)

Fig. 5.5 Measured radiation pattern
(-30dB contour-original)

ターンの吹き付けに合致しないことによる。図 5.6 にその様子を示す。すなわち、-5dB までのコンターは主反射鏡の形状に沿っているが、-10dB 以下になると垂直面を除きズレが大きくなる。このように-30dB という非常に低いレベルを実現するにはこの設計手法では限度があることがわかる。

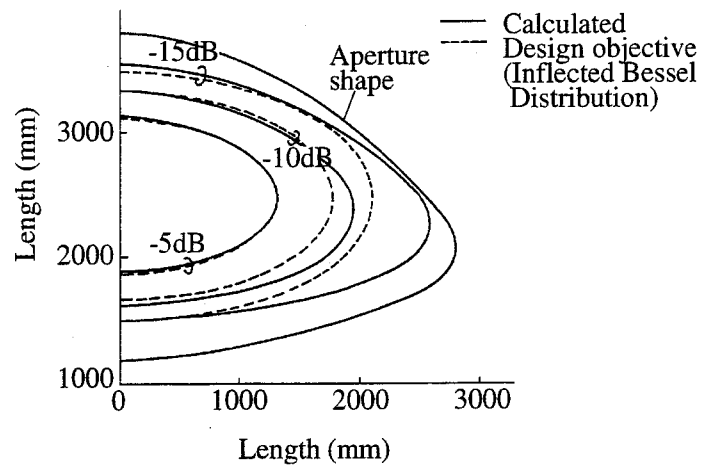


図 5.6 アンテナの開口分布
(計算値と理想値のずれ)

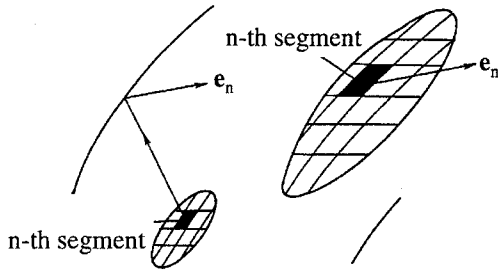
Fig. 5.6 Calculated aperture field distribution
(Difference between a calculated and Inflected Bessel distributions)

5.3 サイドローブレベルの抑圧

5.3.1 鏡面分割構成法の原理

サイドローブレベル抑圧の一方法として、鏡面をいくつかの部分に分割し、それぞれの分割鏡面の相対位置を変えることにより、開口面上の位相分布を制御する方法を考案した。この方法を鏡面分割構成法と称し、以下にその原理を説明する。

放射パターンが鏡面から反射された電波のみで構成されていると仮定する。ここで、対象とするアンテナの放射パターンについてはそれ以外にスピルオーバーによる寄与があるが、注目しているサイドローブが主ビームのごく近傍であること、更にはアンテナの構成を設計上配慮することにより、その寄与は無視しうる。この時、図 5.7 に示すように主反射鏡もしくは副反射鏡を N 個の部分に分割すると、図 5.8 の座標系である方向 (θ, ϕ) で観測される電界 $E(\theta, \phi)$ は各部分鏡面からの寄与の総和になる。



(a) Subreflector division (b) Main reflector division

図 5.7 鏡面の分割と部分鏡面から遠方界への寄与 \mathbf{e}_n

Fig. 5.7 Reflector division and far field contribution from n-th segment \mathbf{e}_n

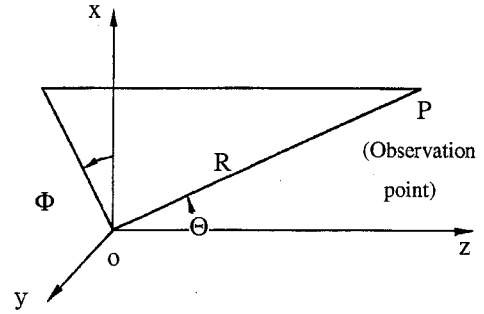


図 5.8 観測座標系 (R, Θ, Φ)

Fig. 5.8 Coordinate for observation point (R, Θ, Φ)

すなわち,

$$\mathbf{E}(\Theta, \Phi) = \sum_n \mathbf{e}_n(\Theta, \Phi) \quad (5.10)$$

$$\mathbf{e}_n = |\mathbf{e}_n| \exp(j\Psi_n) \quad (5.11)$$

ここで, \mathbf{e}_n は n 番目の部分鏡面からの放射電界である.

また,

$$\mathbf{E}_0 = \sum_n |\mathbf{e}_n| = \sum_n \mathbf{e}_n \exp(-j\Psi_n) \quad (5.12)$$

を定義すれば, これは (Θ, Φ) 方向での値を最大にする分布である. そこで他の方向の値にはほとんど影響を与えず, (Θ, Φ) 方向での値を所望の値 \mathbf{E}_1 にするには, \mathbf{E}_0 を用いて次のようにすればよい.

$$\begin{aligned} \mathbf{E} + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{E}_0 &= \mathbf{E}_1 \\ \boldsymbol{\tau} &= \frac{(\mathbf{E}_0 - \mathbf{E})}{\mathbf{E}_0} = |\boldsymbol{\tau}| \exp(j\psi_a) \end{aligned} \quad (5.13)$$

図 5.9 は鏡面分割構成法の原理図を模式的に示す。この時、式(5.13)は

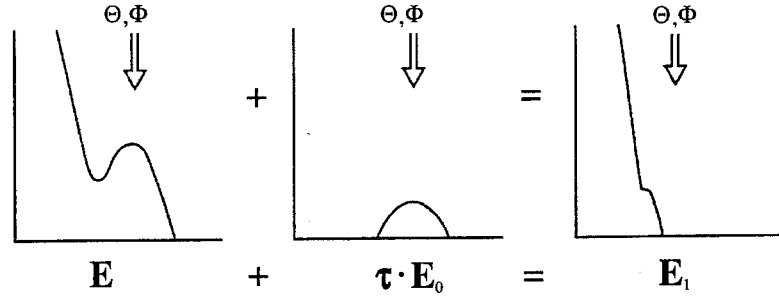


図 5.9 鏡面分割構成法の原理

Fig. 5.9 The principle of APCAR

(Aperture phase distribution control by adjustment of reflector segment)

$$E_1 = \sum_n e_n + \tau \cdot \sum_n e_n \exp(-j\Psi_n) = \sum_n e_n \{1 + \tau \exp(-j\Psi_n)\} \quad (5.14)$$

となるので、各部分鏡面からの電界を $\{1 + \tau \exp(-j\Psi_n)\}$ 倍した分布にすれば E_1 が得られることになる。

すなわち、

$$\begin{aligned} 1 + \tau \exp(-j\Psi_n) &\equiv \omega \exp(-j\Psi_b) \\ \omega &= \sqrt{1 + 2|\tau| \cos(\Psi_n - \Psi_a) + |\tau|^2} \\ \Psi_b &= \tan^{-1} \left[\frac{\{|\tau| \sin(\Psi_n - \Psi_a)\}}{\{1 + |\tau| \cos(\Psi_n - \Psi_a)\}} \right] \end{aligned} \quad (5.15)$$

とおけば、各部分鏡面からの電界を振幅で ω 倍し位相で Ψ_b だけ遅れさせればよい。反射鏡アンテナでは振幅を変えることはできないので、位相のみをとれば Ψ_b だけ遅れさせればよい。

なお、前述したように、 E_0 は (Θ, Φ) 方向以外にはほとんど影響を与えない分布であるから、 (Θ, Φ) 方向のレベルだけを E から E_1 に変えることができる。更に、もし複数の方向のサイドローブレベルを下げたい場合にはその数だけ繰り返せばよい。なお、鏡面分割数 N は対象とするサイドローブの角度 (Θ, Φ)

に応じて決められる．すなわち，一例としてたとえばビームの正面方向からサイドローブ(Θ , Φ)の角度幅に相当するビーム幅を有する代表面積の鏡面に分割する．

5.3.2 e_n の決定法

鏡面分割構成法を実現するためには，各部分鏡面からの放射電界への寄与 e_n を知る必要がある．その方法の1つとして計算値を利用する方法がある．すなわち，あらかじめ各部分鏡面からの放射パターン $e_n(\Theta, \Phi)$ を計算で求めておく方法である．この方法は一度 e_n を計算し，それを記憶させておくことにより，部分鏡面の変化に応じてそれらの線形結合によりアンテナのサイドローブ特性を求めるものである．この方法は鏡面系のパラメータを変えるたびに放射パターンを電流分布法により計算する方法に比べると計算時間は少なくすむ．しかし，この方法でも -30dB 程度まで正確に計算する必要があり，やはり主および副反射鏡にそれぞれ2重積分による電流分布法を適用することになり，計算時間では得策ではない．

そこで，ここでは実験的に e_n を求める方法によった．以下にその方法を述べる．前述したように

$$\mathbf{E} = \sum_n \mathbf{e}_n \quad (5.16)$$

で表されるが，ここで n 番目の部分にのみに厚さ Δt の金属板を付けると，観測される電界 \mathbf{E}_n は次のようになる．

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_n &= (\mathbf{E} - \mathbf{e}_n) + \mathbf{e}_n \exp(j\Delta n) = \mathbf{E} - \{1 - \exp(j\Delta n)\} \mathbf{e}_n \\ \Delta n &\cong -2k\Delta t \cos\theta_n \end{aligned} \quad (5.17)$$

従って， \mathbf{E} ， \mathbf{E}_n の位相，振幅を測定すれば次の式から e_n が求められる．

$$\mathbf{e}_n = \frac{(\mathbf{E} - \mathbf{E}_n)}{\{1 - \exp(j\Delta n)\}} \quad (5.18)$$

(Θ , Φ)方向のレベルを QdB 下げるとすると, $E_1 = q E$, $q = 10^{-Q/20}$ として

$$\tau = \frac{(q-1)E}{E_0} \quad (5.19)$$

となり, 各部分鏡面に厚さ Δt_n の金属板を貼り付ける場合, Δt_n は次のようになる.

$$\Delta t_n \equiv \left(\frac{1}{2k \cos \theta_n} \right) \tan^{-1} \frac{\{|\tau| \sin(\Psi_n - \Psi_a)\}}{\{1 + |\tau| \cos(\Psi_n - \Psi_a)\}} \quad (5.20)$$

ここで, θ_n は図 5.10 に示すように各部分鏡面への電波の入射角である.

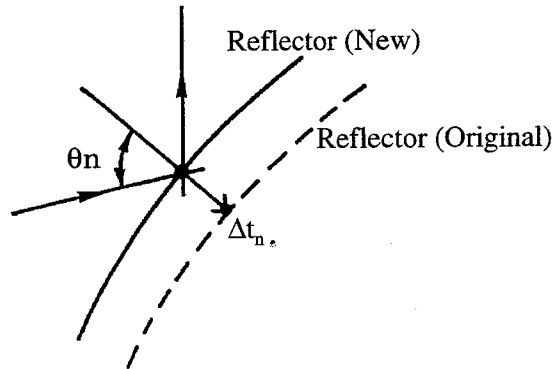


図 5.10 入射角 θ_n と金属板の厚さ Δt_n
Fig. 5.10 Ray incident angle θ_n and a thickness of metal sheet Δt_n

5.3.3 実施例

ここでは副反射鏡に鏡面分割構成法を適用する. 図 5.11 に示すように副反射鏡を分割し, それぞれの部分鏡面からでた電波が主反射鏡で反射された後の放射電界 e_n を実験的に求める. 但し, 鏡面は中心線に対して左右対称でなければならないので, 中心線に関して対称な位置にある二つの部分鏡面からの寄与の合成を e_n としている.

この手法の効果の一例を図 5.12 に示す. この図は, 図 5.5 に示した放射パターンの実測値において, $A_z = 2^\circ$, $E_1 = -1^\circ$ の方向のサイドローブレベルを下

げようとしたものであり、両図を比較すると $A_z = 2^\circ$ 以上に存在していたサイドローブが大幅に改善されていることがわかる。また、図ではわからないが、 $A_z = 2^\circ$, $E_1 = -1^\circ$ の方向のサイドローブレベルは -26.7dB から -29.0dB まで下がっている。一方、図 5.5 にはほとんど見られなかった $A_z = -2^\circ$ 以下のサイドローブレベルが図 5.12 では現れてきている。これは次の理由によるものである。

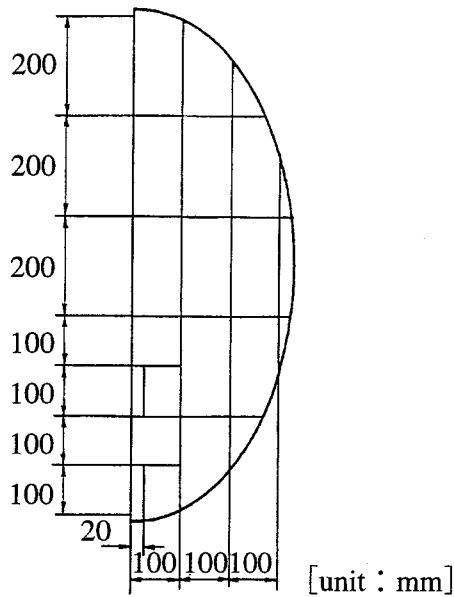


図 5.11 副反射鏡の分割
 Fig. 5.11 Division of subreflector

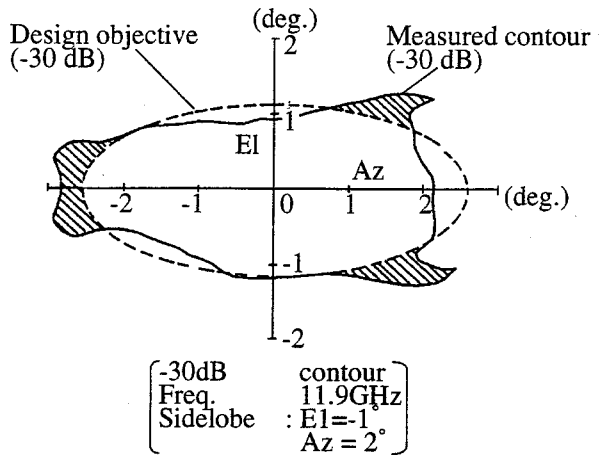


図 5.12 鏡面分割構成法によるサイドローブの抑圧効果(実測例)(その1)
 Fig. 5.12 Improvement effect of sidelobe level (measured)-step 1

- (1) 式 (5.15) で与えられる位相，振幅にすれば他の方向への影響はないはずであるが，実際は位相しか変化できないので，所望の方向以外に影響が出てきている。
- (2) 位相は鏡面上に一定の厚みの金属板を貼り付けて変えているが，厚みの種類が限られているため，式(5.20)で得られた値にできない。

5.3.4 最終性能

以上述べた鏡面分割構成法を次に $E_1 = 0^\circ$, $A_z = -2^\circ$ の方向のサイドローブの抑圧に適用するなど合計で 4 回繰り返す，最終的に得られた放射パターンを図 5.13 に示す。図 5.5 に示したオリジナルの放射パターンと比較すると大幅

に改善されていることがわかる．ここで，副反射鏡の部分鏡面の変位量を図5.14に示す．

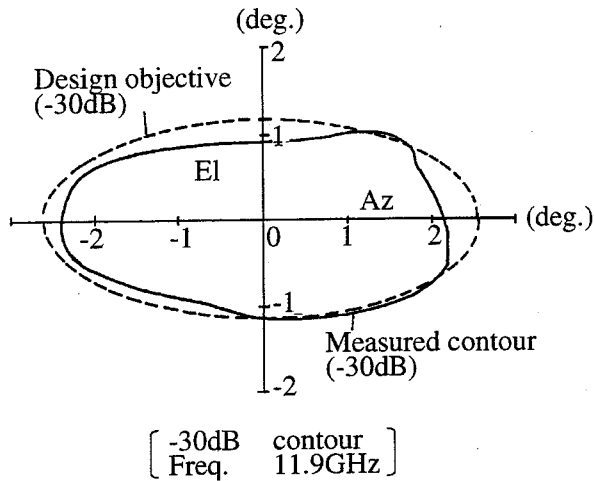


図 5.13 鏡面分割構成法によるサイドローブの抑圧効果（実測例）
（その2：最終）

Fig. 5.13 Improvement effect of sidelobe level (measured)-step 2:Final

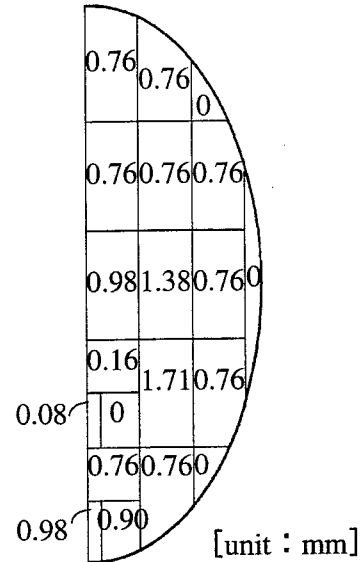


図 5.14 副反射鏡の修整量
（もとの鏡面からの変化量*）
*：鏡面に各数値の板厚の金属板を貼る

Fig. 5.14 Shaped subreflector surface from original

また表 5.2 に最終性能を示す．表よりサイドローブレベルについてほぼ目標値を満足しており，この鏡面分割構成法の有効性が検証できた．更に，その他の項目についても要求性能を満足しており，高性能のアンテナが実現していることがわかる．

表 5.2 アンテナの性能

Table 5.2 Antenna performance (measured)

項 目	目 標 性 能
周波数	11.7～12.1GHz
偏 波	左旋円偏波
3dBビーム幅	1.62°×0.68° (11.9GHz)
利 得	44.8dB以上
交差偏波レベル	-42dB以下
サイドローブレベル	-30dB以下 (図5.13)
主反射鏡の大きさ	開口1.3m×2.8m

5.4 むすび

低サイドローブレベルの性能を要求される楕円ビームオフセット形複反射鏡アンテナにおいて、アンテナを製作後そのサイドローブ特性を改善する手法を示した。特に実験的に所望の鏡面変位量を求める方法として新しく鏡面分割構成法を考案した。放送衛星搭載用アンテナを想定した開口径 $1.3\text{m} \times 2.8\text{m}$ のオフセット楕円ビームアンテナにこの手法を適用し、WARC-BS のアンテナの設計目標値をほぼ満足することができ、設計の妥当性が明らかになった。この手法は、更に設計法の誤差、鏡面の製作精度、鏡面系の設定誤差による影響を含めた総合的なアンテナのサイドローブ特性の改善に適用できる。また、ここで示した鏡面分割構成法は、位相分布を制御できるため単にサイドローブレベルの抑圧のみならずビーム成形などにも応用できる。

第6章

平面波合成法による

成形ビームアンテナの設計法

6.1 まえがき

衛星搭載用反射鏡アンテナにおいて、所要のサービスエリアを効率よく照射する方法として、放射パターンの楕円ビーム化がある。また、サービスエリアの形状により、さらに効率よく照射する方法として、このような楕円ビーム化よりは、主ビームと副ビームによる複合ビームなどの成形ビーム化が考えられる。このような成形ビームを1枚の反射鏡アンテナで実現する方法として、複数の一次放射器を用いる方式[60]や1つの一次放射器と鏡面修整した反射鏡を用いる方式[30, 41-46]などがある。前者の方法によれば、主ビームと主ビームから離れた特定方向に所要の副ビームを有するような複合ビームを実現することは容易であるが、一次放射器の開口の大きさによりビーム間隔が制限されることや、複数の一次放射器を用いているため給電回路が複雑になることに難点がある。また、後者については開口波面に基づく鏡面修整法 (Wavefront synthesis) [30]と開口位相分布に基づく鏡面修整法 (Aperture phase synthesis) [41-46]などがある。

片木ら[30]の方法は、ホーンレフレクタ形式のアンテナにおいて、所要のビーム形状に対応する開口面上の波面の形状を求め、点波源から放射される球面波をその波面に変換するよう鏡面の形状を光路長一定の法則により修整するものである。この場合、開口面上の波面として凸多面体の一部から構成される波面を想定しているため、主ビーム以外の特定の方向に副ビームを有するようなビーム形状を実現することは困難である。

一方, Cherrette ら[41]の方法は, 開口位相分布に基づくもので, 遠方界から開口面上での位相分布の最適化による鏡面修整法である. すなわち, 与えられた開口振幅分布に対し, 遠方界の利得拘束点におけるアンテナ利得の計算値と目標利得の差の2乗和が最小となるよう開口位相分布を最適化する. Cherrette らは, 比較的単純なビーム形状を有する北米大陸を照射するアンテナの設計例を示した. この方法はビーム形状によっては鏡面に不連続性を生ずることがある. この欠点を解消するため, 正源ら[42]は, 利得拘束点におけるアンテナ利得の計算値と目標利得の差に重み付けを行いながら, 隣り合う開口セグメントにおける位相差に拘束条件を付加し, 上記の最小2乗法により位相分布の最適化を図っている. 正源らは複雑なビーム形状で, かつ複数ビームを有する日本の放送衛星用のアンテナの設計例を示した. なお, この方法は周波数帯域専用のアンテナの設計を想定している. 庄木ら[43]の方法は2周波数帯の成形ビームアンテナの設計のために, Cherrette の方法を拡張している. Ramanujiam ら[44]の方法は, 対波長比が比較的大きい開口径のアンテナでは, 振幅分布を固定し, 位相分布のみを変えることでビーム形状が変えられることに着目し, 遠方界から求めた所要の開口分布のうち, 所要の位相分布を実現するように, 光路長一定の法則により, 主もしくは副反射鏡を鏡面修整する方法を示している. Ramanujiam らは, イタリアをサービスエリアとする対波長比が250の開口径の衛星搭載アンテナの設計例を示した. Poulton ら[45]の鏡面修整法は, アレーアンテナの最適化手法を開口面アンテナに拡張したものである. 開口を分割し遠方界を求め所要の合成放射パターンになるよう, 開口位相を最適化するもので, その最適化アルゴリズムとして, 継続的投影法 (Successive projection)を用いている. Poulton らは, この方法を用いてオーストラリア大陸を照射する衛星搭載アンテナの設計を行っている. なお, 庄木, Ramanujiam および Poulton のいずれに於いても, 副ビームを有するビーム形状の設計例はない.

この他, Brown ら[46]の鏡面を2次関数とフーリエ級数で展開し, その係数を最適化する方法がある. すなわち, 所定の位置での遠方界のアンテナ利得の計算値と目標利得との差の2乗和が最小になるように, 最適検索ルーチン (Optimisation search routine)と呼ぶ数値計算で, その係数を決める鏡面修整法で

ある。Brown らは南アメリカをサービスエリアとする衛星搭載アンテナなど 3 つの設計例を示した。

以上のように、これまで比較的単純なビーム形状から複雑なビーム形状の設計例が網羅されている。しかしながら、Cherrette, 正源, 庄木, Ramanujam および Poulton の設計法はいずれも遠方界から求めた開口位相分布の最適化による鏡面修整法であり、この場合鏡面形状は一旦最適位相分布を計算した後、所定の周波数対応で光路長一定の法則から求められる。Brownの方法は遠方界から求めた鏡面係数を最適化する鏡面修整法である。この場合、鏡面形状は直接鏡面係数から求められる。

ここでは開口波面に基づく鏡面修整法を研究する。片木らは、開口面での波面を中心部では球面波、その周辺部では線織面の波面とし、単一ビームを放射するアンテナの鏡面修整法を示した。その設計法を発展させ複数のビームを放射するアンテナの鏡面修整法を示す。この方法は、一つの一次放射器と一枚の反射鏡とで構成される成形ビームホーンレフレクタアンテナにおいて、主ビームと主ビームから離れた特定方向に所要の副ビームを有するような複合ビームを生成するには、まず主ビームに対応する波面を求め、次にその波面と副ビームの方向に向かう平面波面とを適当な振幅比で開口面上で合成し、その波面を実現するよう光路長一定の法則から鏡面を修整するものである。この方法を平面波合成法とよぶ[53]。この場合、鏡面の形状は直接鏡面修整計算から求められる。なお、平面波を利用しているため周波数共用アンテナに適用する場合周波数特性を検討しておく必要がある。

本設計法の基本的性質を調べるため、開口径 950mm, 焦点と鏡面の周囲を結ぶ円錐の頂角(開き角)が 40° で与えられる成形ビームホーンレフレクタアンテナ(定ビームアンテナ)[54]において、周波数を 19.45GHz と 29.25GHz とし、副ビームを $Az=1.1^\circ$, $El=1.4^\circ$ 方向に主ビームのピークレベルに対し -7dB の副ビームを得る検討を行なう。更に、この平面波合成法を日本国内をサービスエリアに想定した 30/20GHz 帯の成形ビームアンテナの設計に適用する。

6.2 節には、平面波合成法による設計方法を、6.3 節には放射パターンの計算法(付録 B を含む)、6.4 節では本設計法の基本的性質と、30/20GHz 帯の成形ビームアンテナの設計を通して本設計法の妥当性を確認する。

6.2 平面波合成法による設計法

主ビームに対応する元の鏡面が与えられているとし、主ビームのほかに特定の方向に向かう副ビームを付け加えたような形状のビームを実現することを考える。図 6.1(a)は元の鏡面からの波面の形状を示す。すなわち開口波面は原点 O を中心とした球面波とその周囲の線織面とから構成されている。このような波面に図 6.1(b)に示すように平面波を合成する。元の鏡面上の基準点を M_0 、鏡面上の任意の点を M 、一次放射器の位相中心を F 、点 F より点 M に至るベクトルを \mathbf{Re}_m 、点 M_0 から点 M に至るベクトルを $\boldsymbol{\rho}$ とする。なお、 \mathbf{e}_m は単位ベクトルである。また新たに副ビームを実現したい方向を示す単位ベクトルを $\boldsymbol{\xi}$ とし、基準点 M_0 をとり単位ベクトル $\boldsymbol{\xi}$ に垂直な平面波面を考える。

元の鏡面上の任意の点 M で、主ビームを放射する電界を \mathbf{E}_{m1} (その振幅を E_{m0} とする)、その点 M で $\boldsymbol{\xi}$ の方向に平面波 (副ビーム) を放射する電界を \mathbf{E}_{m2} とすると、これらの間には次の関係式が成立する。

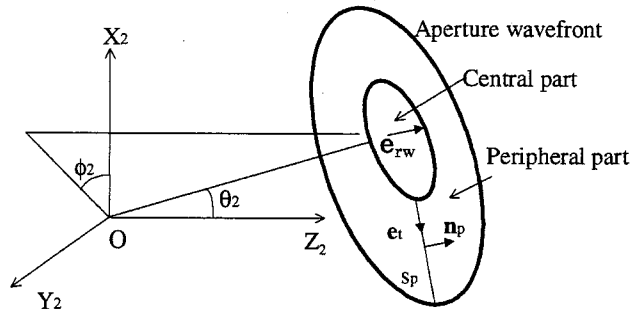


図 6.1(a) 開口波面の形状

Fig. 6.1(a) Structure of aperture wavefront

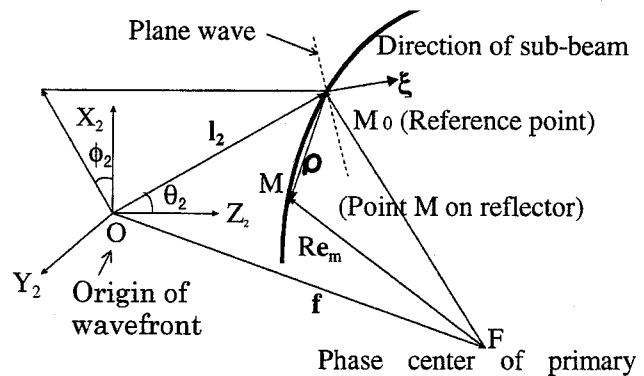


図 6.1(b) 鏡面と波面(鏡面修整前)

Fig. 6.1(b) Reflector system and wave front
(Before reflector shaping)

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{m2} &= a \exp(j\Psi_0) \mathbf{E}_{m1} \exp(j\Psi) \\ \mathbf{E}_{m1} &= \mathbf{E}_{m0} \exp(-jkR) \end{aligned} \quad (6.1)$$

ここで、 k は波数を示す。また、副ビーム方向に一次放射器からのすべてのエネルギーが開口面上に平面波を生成する場合に得られる放射電界に対して、実現しようとする副ビームの放射電界の振幅比を a 、位相差 Ψ_0 とした。また、 Ψ は一次放射器の位相中心 F からでた球面波が単位ベクトル $\boldsymbol{\xi}$ に垂直な平面波に変換されることにより次式を満足する。

$$\Psi - k(R - \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\xi}) = C_7 \quad (6.2)$$

従って、電界 \mathbf{E}_{m1} と電界 \mathbf{E}_{m2} とを合成した電界 \mathbf{E}_m を鏡面上に実現できれば、主ビームと副ビームからなる所望のビームを得ることができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_m &= \mathbf{E}_{m1} + \mathbf{E}_{m2} \\ &= \mathbf{E}_{m1} [1 + a \exp\{j(\Psi_0 + \Psi)\}] \end{aligned} \quad (6.3)$$

一方、鏡面の微小変化では振幅を変化させることができないので、位相変化により所要のビームを形成するとし、鏡面の変位量を $\Delta \mathbf{r}_m$ とすれば次式が成り立つ。

$$\mathbf{E}_m \cong \mathbf{E}_{m1} \exp\{-jk2(\Delta \mathbf{r}_m \cdot \mathbf{n}_m)(\mathbf{e}_m \cdot \mathbf{n}_m)\} \quad (6.4)$$

ここで、 \mathbf{n}_m は元の鏡面の単位法線ベクトルである。

従って、鏡面の変位量 $\Delta \mathbf{r}_1$ を、点 F から出た球面波が元の鏡面で反射した後、進行する方向にそった長さ、すなわち

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r}_m &= \Delta r_{m1} \mathbf{e}_{rw} \text{ (Center)} \\ &= \Delta r_{m1} \mathbf{n}_p \text{ (Peripheral)} \end{aligned} \quad (6.5)$$

とする。なお、ここで、図 6.1(a)に示すように \mathbf{e}_{rw} 、 \mathbf{n}_p はそれぞれ中央部、周辺部の波面の法線方向の単位ベクトルである。

これより,

$$\Delta \mathbf{r}_m \cdot \mathbf{n}_m = -\Delta r_{m1} (\mathbf{e}_m \cdot \mathbf{n}_m) \quad (6.6)$$

が成り立ち, 変位量 Δr_{m1} は

$$\Delta r_{m1} = \frac{1}{2k(\mathbf{e}_m \cdot \mathbf{n}_m)^2} \tan^{-1} \left\{ \frac{a \sin(\Psi_0 + \Psi)}{1 + a \cos(\Psi_0 + \Psi)} \right\} \quad (6.7)$$

となる.

従って, このような変形量を元の鏡面に与えることによって, 主ビーム以外のベクトル ξ の方向に所要の強さの副ビームを得ることができる.

6.3 放射パターン

波面の形が複雑なこのようなアンテナの場合, 放射パターンは開口面上の電界分布を計算するよりも, 鏡面上の電流分布から計算するほうが簡単である. 放射パターンを観測する点 P を表す極座標系 (R_p, Θ, Φ) および一次放射器を表す極座標系 (r, θ, ϕ) を図 6.2 に示す. 図で座標系 x, y, z は原点を変形後の鏡面中心 \bar{M}_0 の直交座標系, また座標系 X_1, Y_1, Z_1 は一次放射器の位相中心 F を原点とした直交座標系で, Y_1 軸は y 軸に平行, Z_1 軸は一次放射器の中心軸に一致している. また元の波面の原点 O を中心に X_2, Y_2, Z_2 の直交座標系をとり, その曲座標表示を (r_2, θ_2, ϕ_2) とする. この場合の放射パターンは次式で求められる.

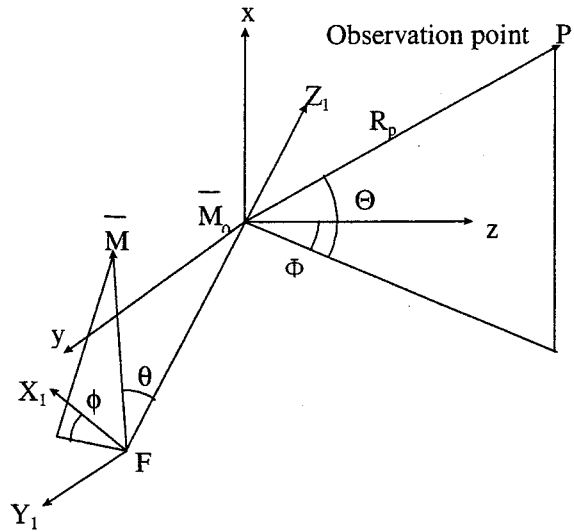


図 6.2 観測点および一次放射器の座標系 (鏡面修整後)

Fig. 6.2 Coordinates of observation point and primary horn (After reflector shaping)

$$\begin{aligned}
 E_s(P) &= -j \frac{1}{\lambda \bar{R}_p} \{ \mathbf{N} - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}_p) \mathbf{r}_p \} \exp(-jk \bar{R}_p) \\
 \mathbf{N} &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \int_S (\bar{\mathbf{n}}_m \times \mathbf{H}_i) \exp(j \bar{\Omega}_0) d\bar{\mathbf{S}}_m \\
 \bar{\Omega}_0 &= k \left[\bar{\boldsymbol{\rho}} \cdot \mathbf{r}_p - \frac{1}{2\bar{R}_p} \{ \bar{\boldsymbol{\rho}}^2 - (\bar{\boldsymbol{\rho}} \cdot \mathbf{r}_p)^2 \} \right] \\
 \bar{\mathbf{n}}_m d\bar{\mathbf{S}}_m &= \frac{\partial \bar{\mathbf{l}}_2}{\partial \theta_2} \times \frac{\partial \bar{\mathbf{l}}_2}{\partial \phi_2} d\theta_2 d\phi_2
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

上式で、 λ は波長、 \mathbf{r}_p は $\bar{\mathbf{M}}_0$ から P に向かう単位ベクトル、 $\bar{\mathbf{n}}_m$ は変形後の鏡面の $\bar{\mathbf{M}}$ での法線方向ベクトル、 S は鏡面の表面、 \mathbf{H}_i は一次放射器から放射される鏡面への入射磁界ベクトルである。 $\bar{\boldsymbol{\rho}}, \bar{\mathbf{l}}_2$ はそれぞれ $\bar{\mathbf{M}}_0$ から $\bar{\mathbf{M}}$ へ向かう、原点 O から $\bar{\mathbf{M}}$ へ向かうベクトルである。また $d\bar{\mathbf{S}}_m$ は変形後の鏡面の面素である。(付録Bに計算の詳細を示す。)

6.4 設計例

図 6.3 に示すように、開口径が 950mm、焦点と鏡面の周囲を結ぶ円錐の頂角が 40° 、オフセット角度が 84.2° で与えられるホーンリフレクタアンテナについての設計例を示す。このアンテナは定ビームアンテナで、この元の鏡面に対応する主ビームは、周波数 19.45GHz および 29.25GHz において、視直径 2° のサービスエリア内を 35dB 以上で照射する放射パターンを有している。この主ビームに対応する波面は、図 6.4 に示すように、球面と円錐面を組み合わせた形状となっている。このようなアンテナにおいて、副ビームを $Az=1.1^\circ$ 、 $El=1.4^\circ$ の方向に得るように、この平面波合成法を用いて鏡面の成形を行い、6.3 節の電流分布法を用いて放射パターンを計算した。

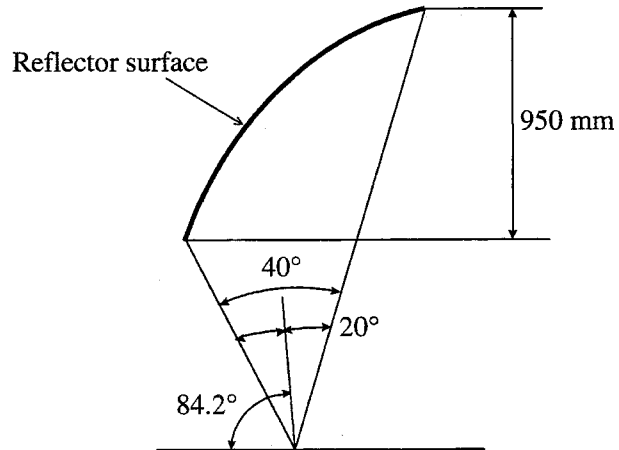


図 6.3 ホーンリフレクタアンテナの諸元
 Fig. 6.3 Dimensions of a horn-reflector antenna

ここでは、19.45GHz の右旋円偏波成分、29.25GHz の左旋円偏波成分の放射パターンを、水平方向 $\pm 2^\circ$ 、垂直方向 $\pm 2^\circ$ の範囲内の 30dB から 1dB 間隔で増加する等高線で示した。

ここで、前章の波数 k は、この平面波合成法を用いることによって生じた図 6.5 に示すような鏡面の凹凸からの反射波が、所要の方向において副ビームを生じるために、平面波となる周波数に対応する波数を示すので、この平面波合成法を周波数共用アンテナに適用する場合にはこの値も重要な設計パラメータとなる。

平面波合成法の基本的性質を調べるために、合成する平面波面に対応する放射電界の位相差

Ψ_0 および波数 k を順次変えて放射パターンを計算し比較検討した。なお振幅比は -7dB として変化させなかった。

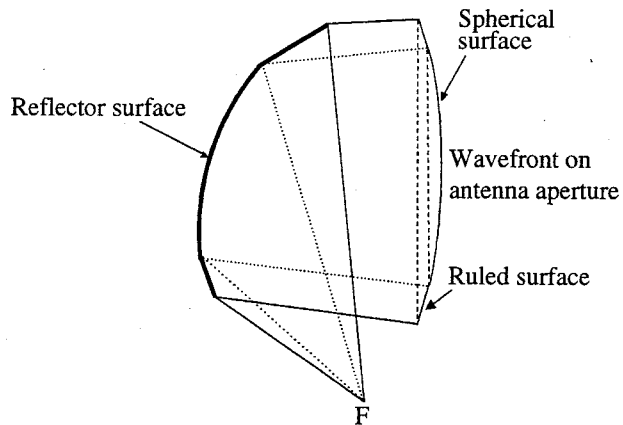


図 6.4 開口面上の波面の形状

Fig. 6.4 Shape of wavefront on antenna aperture

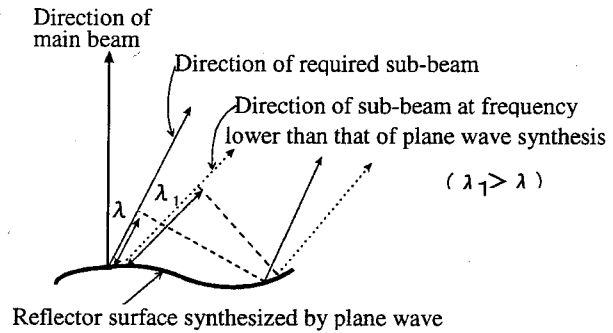


図 6.5 平面波合成による鏡面での副ビームの方向

Fig. 6.5 Direction of sub-beam from reflector surface modified by plane wave synthesis

- (1) 元の鏡面による放射パターン
19.45GHz および 9.25GHz における元の鏡面による放射パターンを図 6.6 (a),

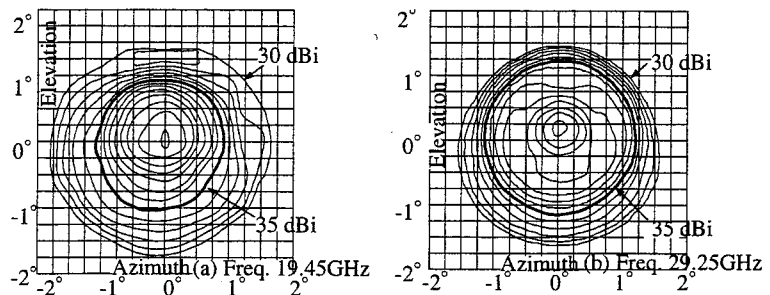


図 6.6 元の鏡面による放射パターン

Fig. 6.6 Radiation patterns from unmodified shaped horn-reflector antenna

(b)に示す. この図からわかるように, 両周波数において, 視直径 2° のサービスエリア内ではほぼ35dB以上のレベルが得られている. なお, 図中太字は35dBのコンターを示す.

- (2) 所要の方向において平面波となる周波数と放射パターンの周波数が一致する場合所要の方向において平面波となる周波数を29.25GHzとし, 位相差を 0° , 90° , -90° , 180° と変化させた場合の29.25GHzでの放射パターンを図6.7(a), (b), (c)および(d)にそれぞれ示す.

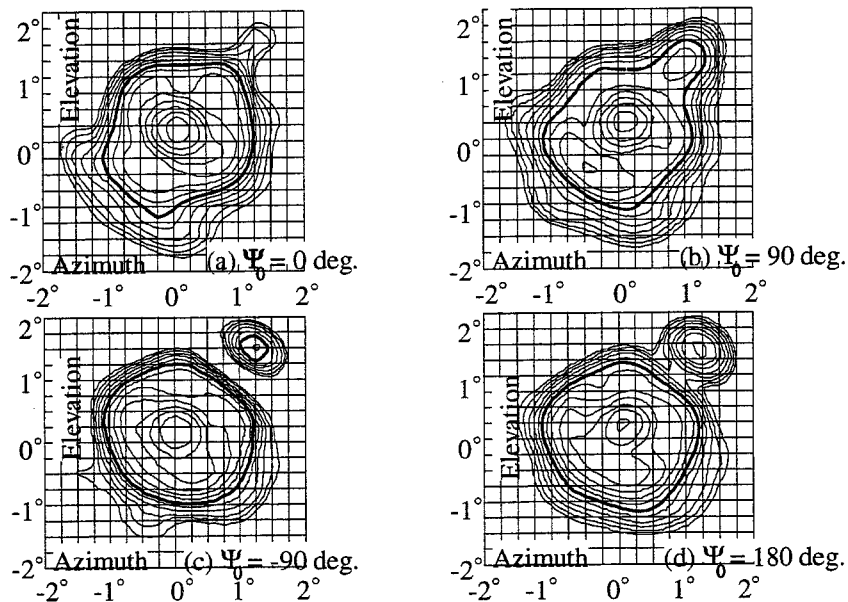


図 6.7 所要の方向において平面波となる周波数を29.25GHzとし, 合成する平面波の位相を変化させた時の29.25GHzでの放射パターン
Fig. 6.7 Radiation patterns at 29.25GHz when plane wave synthesis is made at 29.25GHz

この位相を変化させることにより, 副ビームを得る方向の主ビームの放射電界と, 平面波合成法によって得た副ビームの放射電界の相対位相が変わり, 放射パターンのコンターの形状が異なってくる.

- (3) 所要の方向において平面波となる周波数が放射パターンの周波数より高い場合所要の方向において平面波となる周波数を29.25GHzとし, 位相差を 0° , 90° , -90° , 180° と変化させた時の19.45GHzにおける放射パターンを図6.8(a), (b), (c)および(d)に示す. これらの図からわ

かるとおり，所要の方向で平面波となる周波数により大きく異なり，低い場合にはこの平面波合成の効果は小さいことがわかる．この理由は，29.25GHzにおいて所要の方向に副ビームを生じるように鏡面上に凹凸ができており，図 6.5 に示すようにこの周波数より低い周波数で

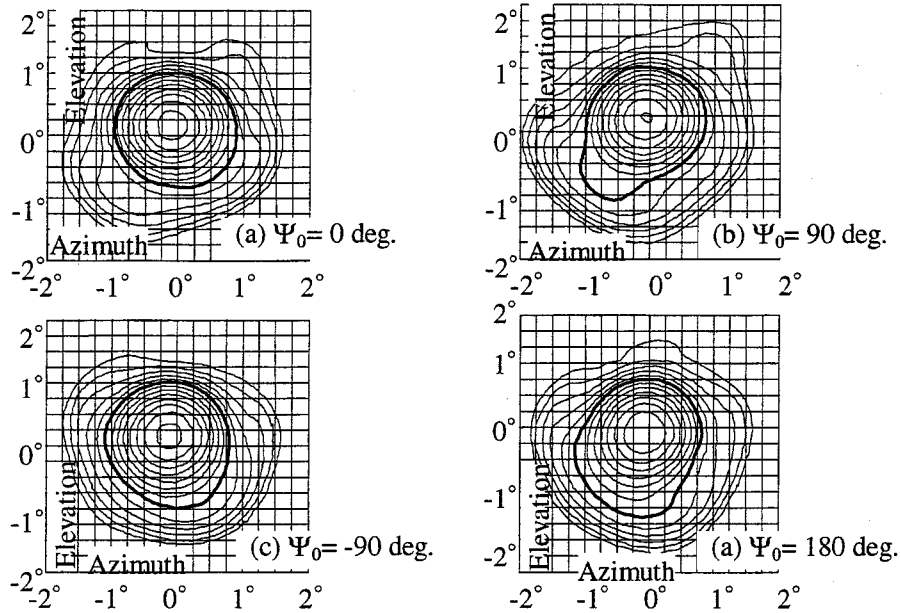


図 6.8 所要の方向において平面波となる周波数を29.25GHzとし，合成する平面波の位相を変化させた時の19.45GHzでの放射パターン

Fig. 6.8 Radiation patterns at 19.45GHz when plane wavesynthesis is made at 29.25GHz

は波長が長くなるので主ビームよりも離れた方向で鏡面の凹凸からの反射波が同相となりその方向に副ビームができるためである．また逆に所要の方向において平面波となる周波数よりも高い周波数では所要の方向よりも主ビームに近い方向に副ビームを形成する．

- (4) 所要の方向において平面波となる周波数が放射パターンの周波数より低い場合所要の方向において平面波となる周波数を 19.45GHz とし，位相差を 45° ， 135° と変化させた場合の 19.45 GHz および 29.25GHz における放射パターンを図 6.9(a)，(b)，(c)および(d)にそれぞれ示す．この図からわかるようにこの場合29.25GHz における放射パターンに与

える影響は(3)の場合に比べて大きく、かつ副ビームの方向が所要の方向より主ビームに近くなっている。このことから周波数帯共用アンテナにおいては、所要の方向において平面波となる周波数を使用する周波数帯の中間の周波数に設定する必要がある。

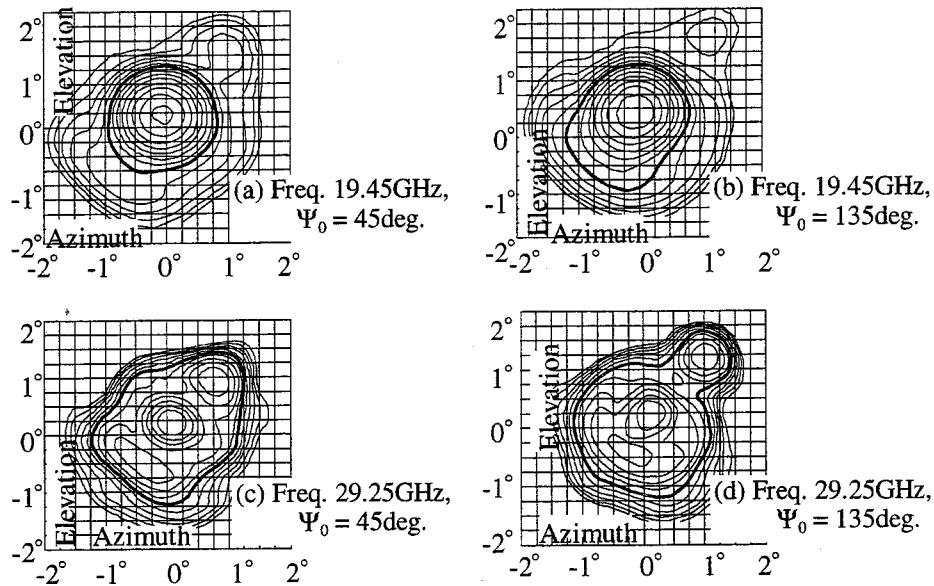


図 6.9 所要の方向において平面波となる周波数を19.45GHzとした時の、19.45GHz、29.25GHzでの放射パターン

Fig. 6.9 Radiation patterns at 19.45GHz and 29.25GHz when plane wave synthesis is made at 19.45GHz

- (5) 所要の方向において平面波となる周波数が放射パターンを計算する二つの周波数の間にある場合所要の方向において平面波となる周波数を26GHzとし、位相を 45° 、 135° とした場合の19.45GHzおよび29.25GHzにおける放射パターンを図6.10(a), (b), (c)および(d)に示す。この図からわかるように、ほぼ所要の方向に副ビームを得ることが分かるが、19.45GHzにおいて副ビームのレベルが低い。従って、これら二つの周波数における放射パターンを比較しながら設計パラメータを変化させ、目的にあった最適値を選定する必要がある。

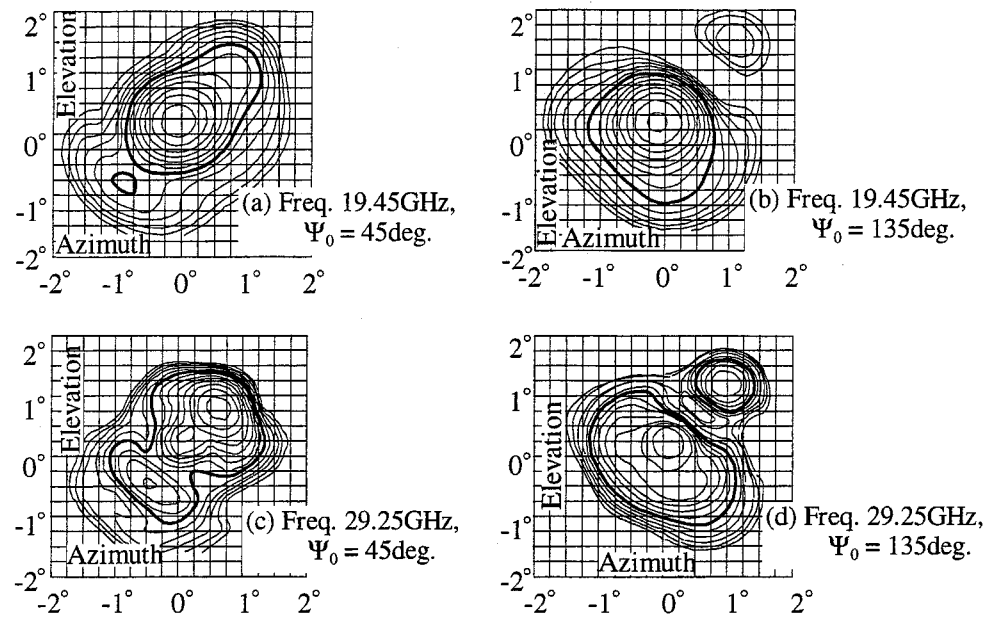


図 6.10 所要の方向において平面波となる周波数を26GHzとした時の、
19.45GHz, 29.25GHzでの放射パターン

Fig. 6.10 Radiation patterns at 19.45GHz and 29.25GHz when plane wavesynthesis is made at 26GHz

6.5 平面波合成の最適設計

6.5.1 最適設計の考えかた

設計パラメータの数が多く放射特性の計算が複雑なアンテナの設計においては、(1)設計パラメータの値をどのようにして変化させるか、(2)最適値をどのようにして選び出すか、が問題で、設計の手順を明確にしたうえで評価関数を定め計算機を用いて最適設計を行い効率的に設計を行う必要がある。一般に評価関数が関数で与えられる場合、最小2乗法[61]や最大傾斜法[61]などにより最適設計が行われる。しかし、評価関数が関数で与えられない場合、直接探索法が考えられ、ここではその一例として実験計画法[62]を研究する。この方法によって、平面波合成法を用いる成形ビームホーンレフレクタアンテナを最適設計する例[63]を示し併せて平面波合成法の利点を述べる。

6.5.2 アンテナの設計パラメータ

国内通信衛星用アンテナとして平面波合成を行う成形ビームホーンレフレクターアンテナを想定し、日本国内をサービスエリアとする 30/20GHz 帯成形ビームアンテナを設計する。日本国内（沖縄を除く）の主要 9 都市方向でのアンテナ利得の設計値を、それぞれの都市での目標利得との差を最小にしつつ、沖縄方向での計算値を目標利得（20GHz で 33dB, 30GHz で 35dB）以上になる

よう、平面波合成法により鏡面修整を行う。設計パラメータは図 6.11 に示すように、4 個のホーンレフレクタに関するパラメータ、9 個の球面波に関するパラメータおよび 5 個の合成する平面波のパラメータの合計 18 個のパラメータである。この内、ホーンレフレクタに関するパラメータ $D=950\text{mm}$, $2\psi_0=40^\circ$, $2\psi_1=18^\circ$, $\varepsilon=95.76^\circ$ と固定し、その他の球面波と平面波に関するパラメータを変化させる。

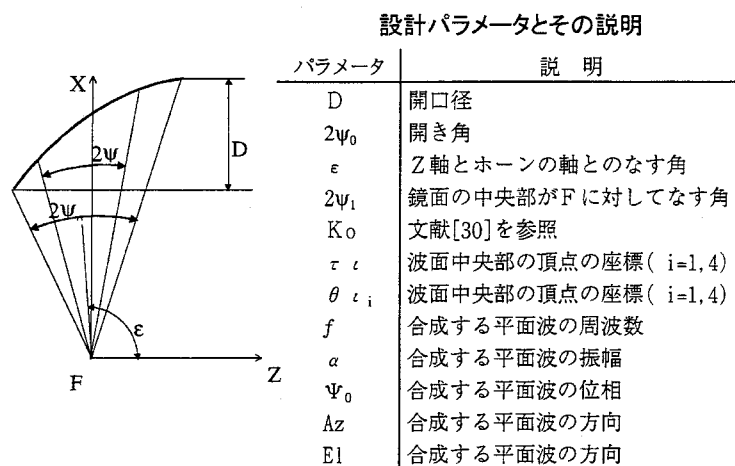


図 6.11 平面波合成による成形ビームホーンレフレクタアンテナ

Fig. 6.11 Shaped-beam horn-reflector antenna modified by plane wave synthesis

6.5.3 計算機を用いた最適設計の効率化

ここでは表 6.1 で示した 10 都市の各々の目標利得に対する計算利得の各々の差において、その中の最低値をなるべく高くすることを評価関数とし、前述の実験計画法を用いてアンテナの最適設計を行う。実験計画法は一般に製造プロセスの歩留まり改善などに用いられている方法であり、これをアンテナの設計に応用する。

表 6.1 各都市での目標利得
Table 6.1 Objective antenna gain at each city

都市 \ 周波数	9.45 GHz	29.25 GHz
札幌	35.0 dB	36.6 dB
仙台	38.0	38.0
東京	38.0	37.8
金沢	39.8	39.3
名古屋	40.0	38.2
大阪	40.1	38.5
広島	37.7	39.7
大分	37.6	40.0
福岡	36.7	40.0
那覇(1)	29.0	30.0
那覇(2)	31.0	32.0

実験計画法では L8 直交表, L16 直交表などがある. ここでは変化させるパラメータが 14 であることから L8 直交表を用いる. L8 直交表を使うので一度の実験(この場合評価関数の計算)で同時に選択できるパラメータは 7 個であり, 14 個の中から 7 個を割り付ける. この割り付けを何度か繰り返し, 寄与率の小さいパラメータから順次固定し, 最終的に 14 個のパラメータを割り付け, 直交表による実験計画法に基づく計算を行うことによりすべてのパラメータを固定する. なお, 各パラメータには 1 回の割り付けでは 2 つの値 (2 水準と呼ばれる) を与える. 2 水準からなる各パラメータを割り付けた L8 直交表を表 6.2 に示す. ここでパラメータ A から G を表 6.2 に基づき変化させて計算した評価関数値を $y_1 \sim y_8$ とする.

表 6.2 L8 直交表
Table 6.2 L8 parameters table

列	A	B	C	D	E	F	G	データ
水準	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	F ₁	G ₁	
行	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂	F ₂	G ₂	
1	1	1	1	1	1	1	1	y ₁
2	1	1	1	2	2	2	2	y ₂
3	1	2	2	2	1	1	2	y ₃
4	1	2	2	2	2	1	1	y ₄
5	2	1	2	1	2	1	2	y ₅
6	2	1	2	2	1	2	1	y ₆
7	2	2	1	1	2	2	1	y ₇
8	2	2	1	2	1	1	2	y ₈

パラメータ数値例

単位 (°)

パラメータ	A	B	C	D	E	F	G
	ϕ_1	θ_1	ϕ_2	θ_2	ϕ_3	θ_3	ϕ_4
第1水準	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	F ₁	G ₁
	66.0	1.28	220.0	1.5	275.0	1.0	343.5
第2水準	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂	F ₂	G ₂
	69.0	1.29	223.0	1.6	278.0	1.1	346.5

他のパラメータ： $D=950\text{mm}$, $2\psi_0=40.0^\circ$, $\varepsilon=95.76^\circ$, $2\psi_1=18.0^\circ$,
 $\theta_4=0.5^\circ$, 平面波のパラメータ $f_0=27.5\text{GHz}$, $a=-7.0\text{dB}$,
 $\phi=-5^\circ$, $Az=1.14^\circ$, $El=1.37^\circ$

各パラメータでの各水準の要因効果の推定値は次のように表される。各水準の要因効果の推定値 $a_1, a_2, \dots, g_1, g_2$ は各水準に関係のあるデータの平均値で与えられるので

$$a_1 = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/4 \quad (6.9a)$$

$$a_2 = (y_5 + y_6 + y_7 + y_8)/4 \quad (6.9b)$$

--

$$g_1 = (y_1 + y_4 + y_6 + y_7)/4 \quad (6.10a)$$

$$g_2 = (y_2 + y_3 + y_5 + y_8)/4 \quad (6.10b)$$

となる。

更に、各パラメータの変動 S_i 、寄与率 ρ_i は

$$S_A = 2(a_1 - a_2)^2 \quad (6.11a)$$

$$S_G = 2(g_1 - g_2)^2 \quad (6.11b)$$

$$S_T = S_A + S_B + \dots + S_G \quad (6.12)$$

$$\rho_A = S_A / S_T \quad (6.13a)$$

$$\rho_G = S_G / S_T \quad (6.13b)$$

となる。

計算プログラムにおいては、第一水準である初期値と第二水準の差である増分を与えることによって、自動的に設計パラメータを8ケース変化させて計算し、指定した評価関数について分散分析表を作成する。次にこの分散分析表を見て新たなパラメータ群を割り付け、再び8ケースの計算を行う。以後最適値を求め繰り返す。

なお具体的な割り付け例として、表6.2に、パラメータA~Gに選んだ波面中央部の頂点の4個の座標と、更にその各々のパラメータの第1および第2水準を示す。

6.5.4 国内通信衛星アンテナの最適設計

那覇の目標利得を拘束せず、従来の設計[30]で計算した値をもとに表6.1の10都市の目標利得を定め、次の手順でアンテナの最適設計を行う。

- (1) 平面波合成した成形ビームホーンレフレクタからの放射パターンとして、予め決めた格子上の各点における利得を電流分布法により計算す

る。各都市における利得を上記の格子上の各点より内挿する。

- (2) 実験計画法のL8直交表を用いて設計パラメータの値を自動的に変化させ、アンテナの最適設計を行う。すなわち表6.2のパラメータで8ケースについて、10都市の各々の都市での目標利得とその各々の都市での計算利得の差において、その中の最低値をなるべく高くすることを評価関数とし、その評価関数の計算を自動的に行い分散分析表を作成する。以後、その得られた結果から、次の割り付けを行い、再度自動的に計算を行う。このような手順を繰り返すことにより最終的にすべてのパラメータの最適値を決める。

なお那覇方向の利得については次の2ケースを想定している。

- (a) ケース1 那覇目標利得を表6.1(1)の29dB(20GHz), 30dB(30GHz)とし、平面波合成をしないとする場合を比較する。
- (b) ケース2 那覇目標利得を表6.1(2)の31dB(20GHz), 32dB(30GHz)とし、平面波合成形で設計する。

各ケースについての計算結果と利得の比較をそれぞれ表6.3, 表6.4に示す。ケース1で平面波合成しない場合、差の最低値は-0.95dBであり、那覇の利得は29.21dB (19.45GHz), 29.43dB(29.25GHz)である。次に平面波合成する場合、差の最低値は-0.61dBであり、平面波合成することにより0.34dB改善できた。那覇の利得は29.64dB (19.45GHz), 29.41dB (29.25GHz)である。またケース2の場合、差の最低値は-1.08dBであり、那覇の利得は30.92dB (19.45GHz), 33.14dB (29.25GHz)となる。このように平面波合成法を用いれば那覇の利得をほぼ所望値とすることができる。更にケース2の場合の最終的な成形ビームアンテナの放射パターン2次元マップを図6.12に示す。この図から、ほぼ日本国内をカバーする成形ビームが得られている様子がわかる。ここで、沖縄方向で所望の利得を得る一方、主要9都市での利得も所要値を満足している。ここで、図の座標系はアンテナの衛星への実装状態を想定しており、Az, El角度は基本検討のものと逆になっている。なお、この計算例では、鏡面修整による鏡面の凹凸の振幅値は約1mmとなっている。

表 6.3 各ケースでの最適設計値
Table 6.3 Optimized antenna gain at each city for Cases 1 and 2

項目			ケース		ケース 1				ケース 2	
					平面波合成なし		平面波合成		平面波合成	
成形ビーム	D		950 mm							
	2 ψ ₀		40 °							
	ε		95.76 °							
	2ψ ₁		18 °							
	K ₀		1.1		1.2		1.1			
	φ ₁ , θ ₁ (°)		46.0,	1.2	66.0,	1.28	66.0,	1.28		
	φ ₂ , θ ₂ (°)		128.0,	0.6	223.0,	1.5	220.0,	1.5		
平面波	φ ₃ , θ ₃ (°)		229.0,	1.6	275.0,	1.0	275.0,	1.0		
	φ ₄ , θ ₄ (°)		277.0,	1.1	343.5,	0.5	345.0,	0.5		
	周波数(GHz)		-----		28.0		27.5			
	振幅(dB)		-----		-10		-7			
		位相(°)		-----		10		-6		
方向(Az, El)(°)			-----		1.09, 1.32		1.14, 1.37			
計算利得 (dB)			GHz	GHz	GHz	GHz	GHz	GHz		
			19.45	29.25	19.45	29.25	19.45	29.25		
都 市	札幌		34.85	35.65	34.57	37.37	34.09	37.23		
	仙台		37.99	38.55	38.49	38.35	37.97	37.03		
	東京		37.59	36.98	38.55	37.19	38.38	36.72		
	金沢		40.15	39.98	40.31	39.37	40.04	39.08		
	名古屋		40.65	37.25	40.72	38.82	40.62	39.12		
	大阪		41.21	38.14	40.85	38.81	40.89	38.97		
	広島		38.55	38.77	38.42	39.09	38.51	38.62		
	大分		38.11	40.44	37.94	39.52	37.93	39.20		
	福岡		36.91	39.80	37.07	40.24	36.98	39.64		
那覇		29.21	29.43	29.64	29.41	30.92	33.14			

表 6.4 利得の比較

Table 6.4 Comparison between antenna gains calculated in various cases

ケース	那覇目標利得		平面波合成形				平面波合成なし			
	20GHz	30GHz	両周波数での値		那覇利得		両周波数での値		那覇利得	
			最低値	平均値	GHz 19.45	GHz 29.45	最低値	平均値	GHz 19.45	GHz 29.45
No.1	29.0	30.0	-0.61	+0.24	29.64	29.41	-0.95	+0.01	29.21	29.43
No.2	31.0	32.0	-1.08	-0.05	30.92	33.14	-----	-----	-----	-----

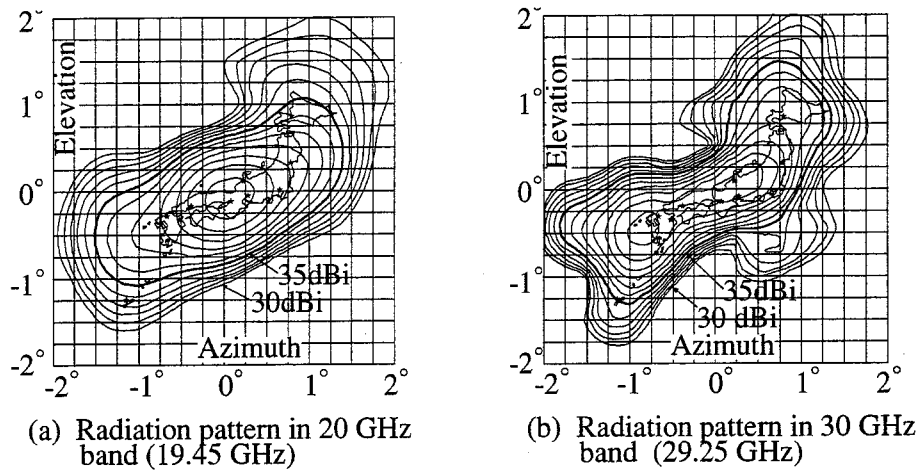


図 6.12 平面波合成法により設計した30/20GHz帯成形ビームアンテナの放射パターン

Fig. 6.12 Radiation patterns of a 30/20GHz contoured-beam horn reflector antenna modified by plane wave synthesis

なお、実験計画法の効果として、ケース 1 の場合において実験計画法を使わない場合に比べ 0.5 dB 改善できた。また 2 ケースでの実験計画法のパラメータ設定は最大 7 回の繰り返しで最適値を得た。

6.6 むすび

主ビームに対応する元の鏡面によって変換された波面と、主ビーム以外の特定方向に向かう副ビームに対応する平面波面とを、開口面上で合成し、その合成した波面を実現するように鏡面を成形することによって所要のビーム形状を得る平面波合成法について、設計方法および定ビームアンテナにおける設計例を示した。

その結果、このような平面波合成法は元のビーム形状をあまりかえないで主ビーム以外の特定の方向に副ビームを得ることができるので、ビーム成形法として有効であることがわかった。更に、日本国内をサービスエリアに想定した 30/20GHz 帯成形ビームアンテナのこの設計法を適用し、所望の成形ビームを得

ることができ、設計法の有効性が確認できた。ここでは、ひとつの副ビームを得る場合について述べたが複数のビームを得る場合にもこの方法が適用される。

更に、実験計画法によるアンテナの最適設計を提案した。この設計法を成形ビームホーンレフレクタアンテナに適用し、その効果を確認し併せて平面波合成法の利点を明らかにした。

また、ここでは元の波面を球面波としたが、元の波面を平面波、副ビームの波面も平面波からなる2ビームアンテナの設計に本設計法が適用できる。このように本設計法は衛星搭載アンテナに限らず、地球局アンテナの複ビーム化に有効な設計法といえる。

第7章

結論

衛星通信用オフセット形反射鏡アンテナの新しい鏡面修整法に関する研究を述べた。衛星通信の初期においては人工衛星は小型であったため大型の地球局を必要とした。しかしながら、近年は人工衛星の大型化、デジタル技術化などの技術的発展に伴い、地球局の小型化が進んでいる。衛星の大型化・大電力化、デジタル技術の導入に伴い、地球局アンテナは小口径となり、高能率・低雑音はもとより、隣接衛星方向を含むサイドローブ特性の低サイドローブ化が要求されている。更に、軌道の有効利用のため、高密度に衛星を配置したいという要求、地球局アンテナの低コスト化の要求、車載実装・屋上設置などアンテナの実装面での機械構造系からの要求と電気的要求をあわせて実現するよう電気設計への要求も出されている。加えて、周波数有効利用のため低交差偏波化も要求されている。

一方、衛星搭載用反射鏡アンテナでは、一つの一次放射器と一枚の反射鏡からなるオフセット形反射鏡アンテナ構成により、低コストで複雑なビーム形状、たとえば親子ビームなどの複ビームにより効率よくサービスエリアを照射しようという要求がある。

このような種々の要求に対し原理的に能率が高く、低サイドローブ特性を有しているオフセット形の複反射鏡アンテナが有効である。本研究は、以上のような背景のもとでの衛星通信に用いるオフセット形反射鏡アンテナの設計法に関するものであり、次のテーマの研究を行った。

- (1) 従来の円形開口に限らず、楕円を含む任意開口のオフセット形複反射鏡アンテナに適用できる新しい鏡面修整法の研究

- (2) 低交差偏波オフセット形楕円ビームアンテナや低サイドローブオフセット形楕円ビームアンテナおよび成形ビームアンテナなど各種オフセット形反射鏡アンテナの設計への上記(1)の鏡面修整法の応用

従来の複反射鏡アンテナの鏡面修整法は開口位相と開口面分布に基づく設計法である。この方法は一次放射器からの放射パターンと開口面分布を常微分方程式でむすび、幾何光学的に鏡面座標を求めるもので、回転対称の複反射鏡アンテナの鏡面修整法として確立された。この鏡面修整法を踏襲し、オフセット形複反射鏡アンテナの鏡面修整法についても、多数の研究がなされた。これらの方法は回転対称形の複反射鏡アンテナにおける鏡面修整の幾何光学的条件である鏡面上の反射の法則、電力保存の法則および光路長一定の法則の3条件に、オフセット形アンテナであることによる可積分条件を加えた4条件より求められる連立偏微分方程式を数値積分することにより、幾何光学的に厳密に鏡面座標を求める鏡面修整法である。この方法は幾何光学的に厳密な解を与えるものである。しかしながら、与える一次放射器からの放射パターンと開口面分布とがいずれも回転対称である場合への適用を考慮したものである。従って、楕円ビームアンテナへの適用が難しいなどの欠点がある。

一方、鏡面修整されたオフセット形複反射鏡アンテナの低交差偏波化について、前述の研究に含まれたが、交差偏波については自由度がなく、その発生量は初期値に依存することになる。この初期値は用いる鏡面修整法によりその定義が異なる拘束条件であり、通常は初期値を変えると交差偏波発生量が変わるとともに鏡面の形状も変わる。アンテナ設計においては、前述の電氣的条件と同様、ブロッキングを避けるための条件やアンテナ全体の大きさに対する条件などの機械構造上条件も重要な設計条件であるため、交差偏波成分の発生を最小にする条件とこれらの機械的条件を同時に満足する初期値を与えることが重要となる。

上述の鏡面修整法においては、鏡面形状や交差偏波特性は与えられた初期値に対し偏微分方程式を数値的に解いて初めて決定されるため、両条件を満足する解を見出すため同じ手順の計算を繰り返すことが必要となる。

一枚の反射鏡を用いる衛星搭載用反射鏡アンテナにおいて所要のサービスエリアを効率よく照射する方法として、主ビームと副ビームによる複合ビームによる成形ビーム化が考えられる。このような成形ビームを1枚の反射鏡アンテナで実現する方法として、一つの一次放射器と鏡面修整した反射鏡を用いる方式がある。この鏡面修整法としてこれまで開口位相分布に基づく鏡面修整法が一般的であった。

以上が従来研究されたオフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法の概略である。これらに対し本研究ではオフセット形複反射鏡アンテナの鏡面設計法として、従来の設計法とは異なる概念の新しい鏡面修整法を考案した。すなわち、従来の設計法のほとんどが開口位相と開口面分布とに基づく設計法であるのに対し、開口波面に基づく設計法である。この設計法は開口面上での波面の形状と光路長一定の法則を基本としている。主および副反射鏡の2枚の反射鏡からなるオフセット形複反射鏡アンテナにおいて、初期値としての回転2次曲面鏡系を与え、鏡面修整関数により副反射鏡を変化させ、開口面上で平面波を実現するように、光路長一定の法則と副反射鏡上での反射の法則とを用いて、主反射鏡の鏡面を求める。各反射鏡位置での波面上での電力保存則より、主反射鏡上での電界分布を求め、電流分布法により遠方放射パターンを計算する。その結果に基づいて鏡面修整関数のパラメータを変化させ、所望の放射特性を有するよう、主・副反射鏡鏡面座標を決定する。

この方法は次の特長がある。

- ① 開口形状および開口面分布は鏡面修整関数を適当に選択することにより任意のものができするため、設計法に汎用性がある。
- ② 一次放射器からの放射パターンは実際の一次放射器のものをを用いるため設計したアンテナは幾何光学的には厳密である。
- ③ 鏡面形状は関数で与えられるため任意の点の座標が厳密である。
- ④ 連立偏微分方程式を解く必要はなく、比較的簡単なアルゴリズムでアンテナ設計が可能である。

第2章に本研究の鏡面修整法の基本の適用例として高能率楕円ビームを実現するオフセット形複反射鏡アンテナの設計法、構成および特性について述べた。設計したアンテナは、開口径が長径4.7m、短径2.3mのほぼ楕円開口の30/20GHz帯のオフセットカセグレンアンテナである。ここでは、主ビームの形状を衛星の位置変動に合わせて楕円形にしている。開口波面に基づく鏡面修整法として、あらかじめ基本の2次曲面鏡を与え、これを適当な鏡面修整関数を用いて変形することにより、所望の開口形状および開口面分布を得ている。この楕円ビーム化により、南北方向には追尾を不要にし、追尾駆動系を大幅に簡易化できた。楕円形開口に対する鏡面修整により、20GHz帯で81%、30GHz帯で76%の高能率特性が得られた。また広角サイドローブ特性は $G=32-25 \log \Theta$, dBi ($1^\circ \leq \Theta \leq 48^\circ$), $G=-10$ dBi ($48^\circ \leq \Theta$) に比べ、5~10dB優れたものになっている。このような楕円ビームを有するアンテナ方式は、アンテナの低コスト化・静止軌道の有効利用の観点から小形地球局アンテナの有力な方式となり、その後のアンテナの主流となった。なお、このアンテナは昭和60年通信の自由化を記念し、郵政省から発行された記念切手の図柄に用いられた。

第3章では高能率を保ちながら、低交差偏波特性を有するオフセット形楕円ビームアンテナを設計するために、第2章に述べた鏡面修整法を改良した。アンテナ設計においては電気的条件と機械的条件を同時に満足するにあたり、従来の方法ではいずれも電気的条件を満足する解を求め、機械的条件を満たすまで数値計算を繰り返す必要があった。ここでは、これらを同時に満足する初期値を見出す、オフセット鏡面の回転対称鏡面への置き換えによる手法を考案した。この研究を、機械的条件を満足し、高効率でかつ低交差偏波特性を有する、オフセット形楕円ビームアンテナの設計に適用した。設計したアンテナは開口径が長径2m、短径1mの楕円開口のオフセット形グレゴリアンアンテナであり、14/12GHz帯の、いわゆる VSAT (Very Small Aperture Terminal) や SNG (Satellite News Gathering) システムに使用されるアンテナである。このアンテナは70%以上の開口能率を有しつつ、交差偏波成分のピーク値として-32dB(要求値はビーム中心方向で-27dB) 以下を実現するとともに、広角サイドローブ特性については CCIR 勧告値 $29-25 \log \Theta$, dBi 以下の特性を十分満足する低サイドローブ特性を有している。更に、高能率・低交差偏波特性を有する円形開口のオフセ

ットカセグレンアンテナでの設計例も示した。この場合、開口能率約 90%，交差偏波成分のピーク値として -44dB を得ている。

第4章では、第3章で述べた主および副反射鏡からなるオフセット形2枚鏡アンテナでの鏡面修整法を3枚鏡アンテナの鏡面修整法に拡張した。2枚鏡アンテナでの鏡面修整法を主・副反射鏡に適用すると、アンテナの開口径が大きくなったとき、主反射鏡を構成するアンテナパネルが多種類の修整鏡面となるため、アンテナの製造コストが上昇し経済的に不利になる。従って、主反射鏡を放物面鏡の一部とする無修整のパラボラとすることにより、製造コストが低減できることが考えられる。3枚鏡アンテナのうち主反射鏡を無修整のパラボラ、ほかの2枚の反射鏡を鏡面修整関数により鏡面修整し、低交差偏波特性を実現する設計法を示した。その設計法により試作した開口径5.5mのアンテナの実測結果を示し、その実測結果から設計法の妥当性を明らかにした。このアンテナは14/12GHz帯のオフセットグレゴリアン形式のインテルサット対応地球局アンテナであり、開口能率75%，交差偏波成分のピーク値 -33dB (要求値はアンテナ正面方向で -30dB 以下)、広角サイドローブ特性としてCCIR勧告値 $27-25\log\Theta$, dBi ($1^\circ \leq \Theta \leq 63^\circ$), -18dBi ($63^\circ \leq \Theta$) 以下の性能を得ている。このアンテナ設計法は低コストで、高能率で交差偏波特性の優れた性能を実現できるため、比較的大型オフセット形の衛星通信地球局アンテナの設計に有効である。

第5章ではきわめて低サイドローブレベルの性能を要求される楕円ビームオフセット形複反射鏡アンテナにおいて、アンテナを製作後、そのサイドローブ特性を改善する手法を示した。所望のサイドローブ特性がきわめて低いサイドローブレベルが要求されるアンテナの設計においてアンテナ設計法の誤差、たとえば幾何光学設計による誤差やアンテナの製作誤差などにより、アンテナを製作後、所望のサイドローブ特性が得られないことが判明する場合がある。このような場合に有効な解決法として、主もしくは副反射鏡を多数の部分鏡面に分割し、それぞれの相対位置を変えることにより開口面上の位相分布を制御し、所望の性能を得る鏡面分割構成法を考案した。この手法は、第2章の鏡面修整法の変形であり、実験的に鏡面修整量を求めていくという点に特徴がある。その方法を開口径が長径1.8m、短径1.3mのオフセット形楕円ビームアンテナに適用し、WARC-BSのアンテナの設計目標値をほぼ満足することができ所望の

性能を得た結果を示す。また、ここで示した鏡面分割構成法は、位相分布を制御できるため単にサイドローブレベルの抑圧のみならずビーム成形などにも応用できる。

第6章では、主ビームとそれに比べ低いレベルの副ビームの親子ビームなど複ビームを放射するオフセット形反射鏡アンテナの鏡面修整法として考案した平面波合成法を述べた。この方法もこれまでの研究と同様開口波面に基づく鏡面修整法である。平面波合成法は、1つの1次放射器と1枚の反射鏡とで構成される成形ビームホーンレフレクタアンテナにおいて、主ビームと主ビームから離れた特定方向に所要の副ビームを有するような複合ビームを生成するには、まず、主ビームに対応する波面を求め、次にその波面と副ビームの方向に向かう平面波面とを適当な振幅比で開口面上で合成し、その波面を実現するよう光路長一定の法則から鏡面を修整する方法である。本設計法の基本的性質を調べるため、開口径 950mm、焦点と鏡面の周囲を結ぶ円錐の頂角(開き角)が 40° で与えられる成形ビームホーンレフレクタアンテナ(定ビームアンテナ)において、周波数を 19.45GHz と 29.25GHz とし、副ビームを $Az=1.1$ 度、 $El=1.4$ 度方向に主ビームのピークレベルに対し -7 dB の副ビームを得る検討を行ない、所望の効果を確認した。更に、この平面波合成法を日本国内をサービスエリアに想定した 30/20GHz 帯の成形ビームアンテナの設計に適用し、元のビーム形状をあまりかえないうで主ビーム以外の特定の方向に副ビームを得ることができ、所望のビーム形状を得られることを明らかにした。更に最適設計を行う手法として実験計画法を述べ、その有効性を確認した。また元の波面を球面波としたが、元の波面を平面波、副ビームの波面も平面波からなる 2 ビームアンテナの設計にも本設計法が適用できる。このように本設計法は衛星搭載アンテナに限らず、地球局アンテナの複ビーム化に有効な設計法といえる。

将来の展望として、本研究によるアンテナ設計法は、その設計の汎用性ゆえに、将来的には任意の複雑なビーム断面形状を持つ反射鏡アンテナ、例えば楕円開口の 3 枚鏡アンテナ、楕円ビームと円形ビームの複合ビームを有するアンテナ、更には衛星通信以外の成形ビームレーダアンテナなどの設計に応用できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，親切にまた熱心にご指導ならびにご鞭撻を賜りました京都大学教授深尾昌一郎博士に喪心より感謝の意を表します。また，本論文をまとめるに際し，有益なご教示，ご助言を頂きました京都大学教授佐藤亨博士，同教授上林彌彦博士ならびに同教授森広芳照博士に深く感謝致します。

高能率楕円ビームオフセットカセグレンアンテナの開発・実用化などを通じてこれまで多岐にわたりご指導して頂きました，東京大学教授高野忠博士（元日本電信電話株式会社），摂南大学教授小川英一博士（元日本電信電話株式会社），茨城大学教授鹿子嶋憲一博士（元日本電信電話株式会社），日本電信電話株式会社未来ねっと研究所主幹研究員堀俊和博士をはじめとする関係各位に篤く御礼申し上げます。

3枚鏡アンテナの開発・実用化などを通じてこれまで多岐にわたりご指導して頂きました三菱電機株式会社顧問遠藤静夫氏（元国際電信電話株式会社），株式会社KDD研究所取締役渡辺文夫博士をはじめとする関係各位に対して篤く御礼申し上げます。

本研究の機会を与えていただきました三菱電機株式会社社友喜連川隆博士に深謝致します。

本研究の機会を与えていただくとともに，日頃常にご指導・ご鞭撻を頂いております，三菱電機株式会社開発本部情報総合研究所所長片木孝至博士に深く感謝の意を表します。また本研究を作成するにあたり，指導頂きました同所光・電波部門部門長浦崎修治博士に深謝致します。

本論文を作成するにあたり，三菱電機株式会社に在職中にご指導頂きました金沢工業大学教授水沢丕雄博士，東京工科大学教授橋本勉博士，岡山理科大学教授武田文雄博士，金沢工業大学教授別段信一博士，三菱電機株式会社顧問竹

内政和氏，三菱マイコンソフトウェア株式会社社長塚田憲三氏に篤く御礼申し上げます。

この論文を作成するにあたり，有益なご指導・ご助言を頂きました三菱電機株式会社情報総合研究所主管技師長真野清司博士，同所光・マイクロ波部部长石田修己博士，同社鎌倉製作所宇宙技術部部长蛭子井貴博士，三菱電機株式会社情報総合研究所アンテナ部チームリーダー牧野滋博士，同部専任出口博之博士，同部主事内藤出氏，社団法人電波産業会研究開発部宮原典夫氏（三菱電機株式会社より出向中），三菱電機株式会社鎌倉製作所宇宙システム部小林右治氏に感謝致します。

京都大学博士後期課程社会人コースへ入学し，学位論文作成の貴重な機会を与えて頂きました三菱電機株式会社通信事業本部本部長常務取締役中西道雄氏，同社電子システム事業本部本部長常務取締役笠井鯉太郎氏，同本部副本部長津藤正信氏，同本部通信機製作所所長萩原護也氏に篤く御礼申し上げます。

この論文を作成するにあたり，各種検討をはじめ計算・測定などに協力された三菱電機株式会社通信機製作所衛星・宇宙通信システム製造部部长吉川義彦氏，宇宙通信株式会社ネットワーク本部副本部長増田剛徳氏（三菱電機株式会社より出向中），三菱電機株式会社通信機製作所衛星・宇宙通信システム製造部通信技術第1課課長飯田明夫氏，同所宇宙システム部宇宙システム1課課長松本操一氏，同所衛星・宇宙通信システム製造部衛星通信技術1課専任小西善彦博士，同所衛星通信システム部衛星通信システム1課主事島脇豊氏，同所衛星・宇宙通信システム製造部衛星通信技術1課主事佐藤裕之氏をはじめとする関係各位に感謝します。

参考文献

- [1] P.W.Hannan, "Microwave Antennas Derived from the Cassegrain Telescope," *IRE Trans.*, Vol. AP-9, No.2, pp.140-153, March 1961
- [2] B.Y.Kinber, "On Two-Reflector Antenna," *Radio Engineering & Electronic Physics*, Vol.6, pp.914-921, June 1962
- [3] T.Kituregawa, M.Mizusawa, "Design of Shaped-Reflector Cassegrain Antenna in consideration of the Scattering Pattern of the Subreflector," *IEEE Int.AP-S Symp. Dig.*, pp.891-896, Sept.1968
- [4] 島田禎晉, 小山正樹, 水沢丕雄, 別段信一, "カセグレンアンテナ集束ビーム一次放射系", 信学論(B). 54-B,11,Nov. 1971
- [5] 糸原志津夫, 遠藤静夫, 畠山賢介, 水沢丕雄, 別段信一, "4回反射集束ビーム給電カセグレンアンテナ," 信学会アンテナ・伝播研資 A.P-71-39, Oct.1971
- [6] 竹内政和, 別段信一, 青木克比古, 水沢丕雄, 武田文雄, "インテルサット5号用地球局アンテナ," 信学会アンテナ・伝播研資 A.P78-6, 1978-5
- [7] G.Goubau, F.Schwering, "On the Guided Propagation of Electromagnetic Wave Beams," *IRE Trans.Antenna Propagat.*, AP-9, No.3, pp.248-256, May 1961
- [8] M.Mizusawa, T.Kituregawa, "A Beam-waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antennas," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, Vol.AP-21, No.6, pp.884-886, Nov. 1973

- [9] F.Takeda, T.Hashimoto, "Broadbanding of Corrugated Conical Horns by means of the Ring Loaded Corrugated Waveguide Structure," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, Vol. AP-24, No.6, pp.786-792, Nov. 1976
- [10] 片木孝至, 浦崎修治, 蛭子井貴, 別段信一, "集束ビーム給電系のビームモード展開による解析および設計法," 信学論(B), J66-B, 3, PP.305-312, 昭 58-3
- [11] 別段信一, 青木克比古, 水沢丕雄, "小型地球局アンテナの放射特性," 信学会アンテナ・伝播研資 A.P76-68, 1976-11
- [12] 高野忠, 小川英一, 堀俊和, 別段信一, "オフセットカセグレンアンテナ地球局アンテナの設計とその特性," 信学論(B), 63-B, 3, pp.232-239, March 1980
- [13] R.W.Kreutel, "Wide-angle sidelobe envelopes of a Cassegrain Antenna," *COMSAT Tech. Rev.*, 6, 1, pp.71-88, 1976, Spring
- [14] N.Matsunaka, S.Betsudan, T.Katagi, "Sidelobe Level Reduction by Improvement of Strut Shape," *1981 IEEE AP-S Inter.Symp.* pp.496-499, 1981
- [15] 小川英一, 高野忠, 片木孝至, 青木克比古, "大口径オフセットカセグレンアンテナの広角放射パターンに影響する要因とその対策" 信学会アンテナ・伝播研資 A.P79-46, 1979-7
- [16] 水沢丕雄, 片木孝至, "回転2次曲面鏡の一性質," 信学論(B), 53-B, p.707, 昭 45-1
- [17] R.Graham, "The Polarization Characteristics of Offset Cassegrain Aerials," *IEE Int. Conf. on Radar-Present and Future*, No.105, 1973
- [18] 田中宏和, 水沢丕雄, "オフセット複反射鏡アンテナにおける交差偏波消去反射鏡設計," 信学会アンテナ伝播研資, A.P73-84, 昭 48-2

- [19] 田中宏和, 水沢丕雄, “オフセット複反射鏡アンテナにおける交差偏波の消去,” 信学論(B), 58-B, 12, pp.643-650, 昭 50-12
- [20] Y.Mizuguchi, M.Akagawa, H.Yokoi, “Offset Dual Reflector Antenna,” *IEEE, AP. Int. Symp.*, 1976
- [21] 水沢丕雄, 田中宏和, “鏡面修整オフセットカセグレンアンテナ,” 信学会アンテナ伝播研資 A.P 74-37, 1974-08
- [22] V.Galindo-Israel, R.Mitra, A.G.Cha, “Aperture Amplitude and Phase Control of Offset Dual Reflectors,” *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, AP-27, No.2, pp.154-164, March 1979
- [23] B.S.Westcott, F.A.Stevens, F.Brickell, “GO Synthesis of Offset Dual Reflectors,” *IEE Proc.*, Vol.128, Pt.H, No.1, PP.11-18, 1981
- [24] 野本真一, 水口芳彦, “オフセット形双反射鏡アンテナの鏡面修整について,” 信学技報, AP86-24, 1986
- [25] V.Galindo-Israel, W.A.Imbriale, R.Mitra, “On the Theory of Synthesis of Single and Dual Offset Shaped Reflector Antennas,” *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, AP-35, No.8, pp.887-896, Aug., 1987
- [26] 野本真一, “鏡面修整による反射鏡アンテナの高性能化に関する研究,” (学位論文), 早稲田大学, 1992 年 12 月
- [27] 水沢丕雄, 久郷幸次, “アンテナの指向性合成の理論と実際[Ⅲ完], ” 信学会誌, 第 59 卷 6 号, pp.626-632, 6 月 1976 年
- [28] A.S.Dunbar, “Calculation of Doubly Curved Reflectors for Shaped Beams,” *Proc. IRE*, 36, pp.1289, Oct.1948

- [29] Motoo Mizusawa, Shinichi Betudan, Shuji Urasaki, Masanao Iimori, "A Doubly Curved Reflector Antenna having Good Circular Polarization Characteristics," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, AP-26, No.3, pp.455-458, May, 1978
- [30] T.Katagi, Y.Takeichi, "Shaped- Beam Horn-Reflector Antenna," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, AP-23, No.6., pp.757-763, Nov.1975
- [31] V.Galindo, "Design of Dual-Reflector Antennas with Arbitrary Phase and Amplitude Distribution," *IEEE Trans.Antenna Propagat.*, AP-12, No.4, pp.403-408, July 1964
- [32] J.J.Lee,L.I.Parad,R.S.Chu, "A Shaped Offset-Fed Dual Reflector Antenna," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*,AP-27, No.2 ,pp165-171, March 1979
- [33] R.Mitra,F.Hyjazie,V.Galindo-Israel, "Synthesis of Offset Dual Reflector Antenna Transforming a Given Feed Illumination Pattern into a Specified Aperture Distribution," *IEEE Trans.Antenna Propagat.*, AP-30, No.2, pp.251-259, March 1982
- [34] 荻込正敏, 鹿子嶋憲一, "サイドローブと交差偏波識別度をともに向上しうるオフセット複反射鏡アンテナの設計" 信学技報 AP84-471984
- [35] 福原, 佐藤, "微分方程式論," 共立出版, 1957
- [36] 水口芳彦, 横井寛, "オフセット形双反射鏡アンテナの曲面について," 信学論(B), 58-B, N0.2, PP.94-95, 昭 50-02
- [37] 野本真一, 水口芳彦, "回転対称な開口分布を有するダブルオフセット双反射鏡アンテナとその放射特性," 信学技報, AP85-16, 1985
- [38] K.Pontoppidan, P.H.Nielsen, "Dual Reflector System Shaped for Elliptical Beam with Good Efficiency and Sidelobe Performance," *IEE.Conf.Publication, 2119, Proc. of ICAP*, 1983

- [39] B.S.Westcott, R.K.Graham, F.Brickell, "Systematic Design of a Dual Offset Reflector Antenna with an Elliptical Aperture," *IEE Proc.*, Vol.131, Pt.H, PP.365-370, 1984
- [40] H.H.Viskum,H.Wolf,A.Lindley, "A Dual Band (11/12/14GHz) Dual Polarized Shaped Dual Offset Reflector System for High Efficiency Steerable Elliptical Beam Coverage for the Fixed Satellite System, *AIAA 14th Int. Communication Satellite Sys. Conf.* ,pp.1542-1551,1992
- [41] A.R.Cherryette,S.W.Lee and R.J.Acosta, "A Method for Producing Shaped Contour Radiation Pattern Using a Single Shaped Reflector and a Single Feed," *IEEE Trans.Antenna & Propagat.*, Vol. AP-37, No.6, pp.698-706(1988)
- [42] K.Shogen.H.Nishida and N.Toyama, "Single Shaped Reflector Antenna for Broadcasting Satellite," *IEEE Trans.Antenna&Propagat.*, Vol., AP-40, No.2, pp.178-187,(1992)
- [43] 庄木裕樹, 川端一彰, "単一修整鏡面による2周波帯ビーム成形," 信学技報, A.P89-71
- [44] P.Ramanujam , W.A. Adata and G.Crone, "Geometrical Optics Shaping of Large Dual Offset Reflectors for Contoured Beam Radiation," *IEEE International Symposium Digest on Antennas and Propagation*, 41-1(1989)
- [45] G.T.Poulton and S.G.Hay , "Efficient Design of Shaped Reflector Using Successive Projections," *Electron Lett.*, Vol 27, No.23, pp.2156-2158(1991)
- [46] R.C.Brown, P.J.B. Clarri coasts and H.Zhou, "Spacecraft Antenna Design Using Optimization," *Proc. European Microwave Conf.*, pp.497-502 (1987)
- [47] K.Aoki, S.Makino, T.Katagi, K.Kagoshima, "Design Method for an Offset Dual-Shaped Reflector Antenna with High Efficiency and an Elliptical Beam," *IEE Proc.-H*, Vol.140, No.2, pp.121-128, April 1993

- [48] K.Aoki, N.Miyahara, S.Makino, S.Urasaki, T.Katagi, "Design of an Offset Shaped Dual Reflector Antenna with an Elliptical Aperture having Low Cross Polarization Characteristics," *IEE Proc.-Microw.Antennas.Propag.*, Vol.146, No.1, pp.60-64, Feb. 1999
- [49] 青木克比古, 蛭子井貴, 牧野滋, 荻原光男, 松本操一, "SNG 用小型地球局アンテナ," 三菱電機技報, Vol.65, No.10, 1991
- [50] 青木克比古, 牧野滋, 浦崎修治, 増田剛徳, "主反射鏡をパラボラとする 3 枚反射鏡アンテナにおける低交差偏波鏡面系の設計," 信学論 B - II, 1999-1
- [51] 遠藤静夫, 松沢清貴, 中村立美, 青木克比古, 増田剛徳, 牧野滋, "Ku 帯 IBS 用の 5.5m オフセットグレゴリアン地球局アンテナの概要," 信学総全大, 632, 昭 6 2
- [52] 青木克比古, 牧野滋, 片木孝至, "オフセット楕円ビームアンテナの低サイドローブ特性の実現法," 信学論 (B-II), Vol.J81-B-II, No.8, pp.789-796, 1998-8
- [53] 青木克比古, 片木孝至, 蛭子井貴, "平面波合成法による成形ビームアンテナ," 信学論 B, Vol.J 82-B, No.6, pp.1-11, 1999-6
- [54] 塚本賢一, 手代木扶, 小室英雄, 武市吉博, 根本幸昭, 武田文雄, 片木孝至, 渡辺紀, "衛星搭載用準ミリ波帯定ビームアンテナ," 信学全大, S 6—6, 昭 49
- [55] 鹿子嶋憲一, 井上武夫, 佐藤滋, "マイクロ波小容量方式アンテナの構成と特性," 信学技報, A.P81-13, 1981
- [56] 正源和義, "円偏波給電用楕円コルゲート導波管の特性," 682, 信学総全大, 昭 6 0

- [57] S.Makino, S.Urasaki, T.Katagi, "Design of array-fed multiple shaped beam antenna through maximizing minimum gain, " *Proc. ISAP'85*, 111-4
- [58] M.J.Gans, "Cross Polarization in Reflector Type Beam Waveguides and Antennas, " *BSTJ*, Vol.55, No.3, PP.289-316, March 1976
- [59] 浦崎修治, 牧野滋, 片木孝至, " 交差偏波消去条件を満たす三枚鏡アンテナ, "信学論(B), vol. 67-B, no.10 pp1119-1125 , Oct. 1984
- [60] 梶川実, 安永啓一, 植野船首, 諸岡翼, 鈴木康夫, 黒木盛司, " 放送衛星 2 号搭載用アンテナ(PFM)の開発, " 信学全大, S-4-7, 昭 58
- [61] 電子通信学会, "アンテナ工学ハンドブック, " 11 章, オーム社, 1980
- [62] 田口玄一, " 実験計画法, " 丸善, 1985
- [63] 青木克比古, 片木孝至, 蛭子井貴, 深尾昌一郎, "平面波合成法による成形ビームアンテナの最適設計, " 信学論 B Vol.J82-B, No.7, pp.1-4, 1999-7

文献リスト

1 主要論文

- 1 K.Aoki, S.Makino, T.Katagi, K.Kagoshima, "Design Method for an Offset Dual-Shaped Reflector Antenna with High Efficiency and an Elliptical Beam," *IEE Proc.-H*, Vol.140, No.2, pp.121-128, April 1993
- 2 K.Aoki, N.Miyahara, S.Makino, S.Urasaki, T.Katagi, "Design of an Offset Shaped Dual Reflector Antenna with an Elliptical Aperture having Low Cross Polarization Characteristics," *IEE Proc.-Microw.Antennas.Propag.*, Vol.146, No.1, pp.60-64, Feb. 1999
- 3 青木克比古, 牧野滋, 片木孝至, "オフセット楕円ビームアンテナの低サイドローブ特性の実現法," 信学論 (B-II), Vol.J81-B-II, No.8, pp.789-796, 1998-8
- 4 青木克比古, 牧野滋, 浦崎修治, 増田剛徳, "主反射鏡をパラボラとする3枚反射鏡アンテナにおける低交差偏波鏡面系の設計," 信学論B, Vol.J82-B, No.1, pp.71-80, 1999-1
- 5 青木克比古, 片木孝至, 蛭子井貴, "平面波合成法による成形ビームアンテナ," 信学論B, Vol.J82-B, No.6, pp.1-11, 1999-6
- 6 青木克比古, 片木孝至, 蛭子井貴, 深尾昌一郎, "平面波合成法による成形ビームアンテナの最適設計," 信学論B Vol. J82-B, No.7, pp.1-4, 1999-7

2 関連論文

- 1 竹内政和, 別段信一, **青木克比古**, 水沢丕雄, 武田文雄, “インテルサット5号用地球局アンテナ,”
信学会アンテナ・伝搬研資 A.P78-6, 1978-5
- 2 別段信一, **青木克比古**, 水沢丕雄, “小型地球局アンテナの放射特性,”
信学会アンテナ・伝播研資 A.P76-68, 1976-11
- 3 小川英一, 高野忠, 片木孝至, **青木克比古**, “大口径オフセットカセグレンアンテナの広角放射パターンに影響する要因とその対策”
信学会アンテナ・伝播研資 A.P79-46, 1979-7
- 4 **青木克比古**, 蛭子井貴, 牧野滋, 荻原光男, 松本操一, “SNG 用小型地球局アンテナ,” 三菱電機技報, Vol.65, No.10, 1991
- 5 遠藤静夫, 松沢清貴, 中村立美, **青木克比古**, 増田剛徳, 牧野滋,
“Ku 帯 IBS 用の 5.5m オフセットグレゴリアン地球局アンテナの概要,”
電子情報通信学会創立 70 周年記念総合全国大会 (昭和 62 年) 632,
pp.3-74, 1987

3 その他の論文

- 1 別段信一, **青木克比古**, 浦崎修治, 水沢丕雄, “集束ビーム給電カセグレンアンテナの放射特性,” アンテナ・伝播研究会資料 A・P73-29(1973-06)
- 2 別段信一, **青木克比古**, 水沢丕雄, “小型地球局アンテナの放射特性,”
昭和 51 年度電気関係学会関西支部連合大会 S 5-6
- 3 塚本賢一, 小嶋弘, 尾嶋武之, 西村昭三, **青木克比古**, “実験要中容量静止通信衛星主局 30/20GHz 帯アンテナ,”
昭和 51 年度電子通信学会光・電波部門全国大会, 74, 1976

- 4 糸原志津夫, 武田文雄, **青木克比古**, “直交偏波共用アンテナ給電装置,”
昭和 52 年度電子通信学会総合全国大会, 527, 1977
- 5 高野忠, 小川英一, 大沢武, **青木克比古**, 浦崎修治, “準ミリ波オフセ
ットカセグレン地球局アンテナ,”
三菱電機技報, Vol.54, No.12, pp.58-62, 1980
- 6 武田文雄, 石田修己, **青木克比古**, “4, 6, 11, 14GHz 共用リング装荷
コルゲートホーン,” 昭和 56 年度電子通信学会全国大会 668, pp.3-109,
1981
- 7 遠藤静夫, 小川明義, 松中直人, 石井康一, **青木克比古**, 岡田東亜,
“インテルサット V 号用地球局アンテナの構成とその放射特性,”
昭和 56 年度電子通信学会総合全国大会, 2067, pp.8-110, 1981
- 8 遠藤静夫, 松中直人, 石井康一, **青木克比古**, 岡田東亜, “山口衛星通
信所第 2 アンテナ,” 三菱電機技報, Vol.55, No.12, pp.44-46, 1981
- 9 藤本忠助, 別段信一, **青木克比古**, 土谷牧夫, “海事衛星 TT&C 地球局
C/L バンド共用カセグレンアンテナ,” 信学技報 A・P82-13 (1982-5)
- 10 森本雅樹, 海部宣男, 滝沢幸彦, **青木克比古**, 榊原修, “大型アンテナ
のホモロジー設計,” 三菱電機技報, Vol.56, No.7, pp.17-20, 1982
- 11 星義隆, 竹田勝彦, **青木克比古**, 尾形良征, “マイクロ波固定局 (集中
局) 兼衛星監視制御信号送受信局用アンテナ装置,” 昭和 58 年度電子
通信学会総合全国大会, 2148, pp.8-128, 1983
- 12 土谷牧夫, **青木克比古**, 別段信一, 磯田陽次, 武田文雄, “衛星通信地
球局用 800MHz 帯域幅給電装置,”
昭和 59 年度電子通信学会総合全国大会, 2494, pp.10-194, 1984
- 13 中西道雄, **青木克比古**, 伊藤久明, “衛星通信システム,”
三菱電機技報, Vol.60, No.10, pp.30-33, 1986

- 14 牧野滋, 浦崎修治, 増田剛徳, **青木克比古**, “主反射鏡をパラボラとする 3 枚反射鏡アンテナにおける低交差偏波鏡面系の設計,” 電子情報通信学会創立 70 周年記念総合全国大会(昭和 62 年) 642, pp.3-84, 1987
- 15 増田剛徳, 土谷牧夫, 竹林和芳, **青木克比古**, “Ku 帯 TCR/CSM 局用 10m カセグレンアンテナ,” 昭和 63 年電子情報通信学会秋季全国大会, B-71, pp.B-1-71, 1988
- 16 **青木克比古**, 蛭子井貴, 牧野滋, 荻原光男, 松本操一, “SNG 用小型地球局アンテナ,” テレビジョン学会技術報告 ITEJ Technical Report, Vol.15, No.59, pp.7-12, Oct. 1991
- 17 森広芳照, 堀俊和, **青木克比古**, 吉川義彦, 早川喜夫, “NTT DYANET 用 30/20GHz 帯デュアルビームアンテナ,” 三菱電機技報, Vol.66, No.4, pp.33-38, 1992
- 18 Tsuyoshi Fuji, Makio Tsuchiya, Yoji Isota, **Katsuhiko Aoki**, “Design and Performance of Mobile Terminal for North American MSAT Network,” *IMSC'95*, pp.365-369, 1995
- 19 **青木克比古**, “移動体衛星通信システム,” 三菱電機技報, Vol.68, No.12, 1994
- 20 **青木克比古**, “移動体衛星通信地球局の構成技術,” 電子情報通信学会誌, Vol.79, No.4, pp.380-382, 1996-4

付録

A 第4章の式の導出

回転対称修整鏡面を鏡面定数が異なる回転対称2次曲面鏡群に展開する方法を開発した。以下、その方法を述べる。本文第4章の図4.5で点 F_0 から $\hat{\phi}$ 方向にでた光線は#1, #2反射鏡を経た後、点 F_1 からみて $\hat{\theta}$ の方向に入射し、次に主反射鏡をへて開口面に至る。ここで、開口面上での位置を u とする。開口面上での要求分布を与えると#2反射鏡の反射電界 $E_d(u)$ が決まり、一方#1反射鏡への入射電界 $E_i(\hat{\phi})$ は一次放射器の寸法が与えられれば決まるので、この間の電界分布の変換を#1反射鏡、#2反射鏡の鏡面修整で実現する。すなわち、#1反射鏡で電界分布の振幅を制御し、#2反射鏡で位相分布を補正する。なお、主反射鏡はパラボラであるゆえ、点 F_0 から点 F_1 に至る光線の光路長は $\hat{\phi}$ に関係なく一定である。

例えば、開口上での要求分布を一様分布とする場合、次式が成り立つ。

$$E_d(u) = \frac{2f_m}{1 + \cos \hat{\theta}} \quad (0 \leq \hat{\theta} \leq \hat{\theta}_0) \quad (A.1)$$

$$f_m = \frac{D_m}{4 \tan \frac{\hat{\theta}_0}{2}}$$

図A.1は#1反射鏡を楕円鏡、#2反射鏡を双曲面鏡とした基準として与える2次曲鏡系Iとその修整鏡面系IIを示す。一次放射器の位相中心 F_0 は両系の楕円鏡の一方の焦点に一致し、もう一方の焦点は鏡面系I, IIで異なり各々 F' , F'' する。鏡面の中心軸を Z 軸とし、この軸に沿う光線が鏡面系I, IIの楕円鏡とそれぞれ H_0 , H で交点をもち、これらの点で反射した光線が双曲面鏡上の点

S_0 , S に向かうものとする. なお, 双曲面鏡のもう一方の焦点は両系で一致しており F_1 である.

鏡面系 I において, Z 軸に沿う光線について考える. ここで, この鏡面系は, 次の 4 個のパラメータで与えられる.

$$L_1 = |\overrightarrow{F_0 H_0}|$$

e_{10} : 基準の楕円鏡の離心率

e_{20} : 基準の双曲面鏡の離心率

$$d = |\overrightarrow{H_0 S_0}| = L_2 - L_3$$

点 F_0 から点 F_2 までの全光路長 C_5 は次式となる.

$$C_5 = \frac{2}{(1+e_{20})} \left\{ d - \frac{(e_{10}-e_{20})}{(1-e_{10})} L_1 \right\} \quad (A.2)$$

次に, II の楕円鏡に入射する光線について考える. ここで, 次の 3 つの鏡面パラメータを変数とする.

$$\hat{P}_1 = |\overrightarrow{F_0 H}| \quad (A.2)$$

e_1 : 楕円鏡の離心率

e_2 : 双曲面鏡の離心率

光路長一定の条件から II について次のようになる.

$$C_5 = \frac{2P_1}{1-e_1} - \frac{2P_{n2}}{e_2} \quad (A.3a)$$

$$P_{n2} = \frac{1}{2} \left(\frac{2e_1}{1-e_1} P_1 - h \right) \quad (\text{A.3b})$$

$$h = \frac{2e_{20}}{1+e_{20}} d + \frac{2(e_{10} - e_{20})}{(1-e_{10})(1+e_{20})} L_1 \quad (\text{本文中の式 (4.14g)}) \quad (\text{A4.3c})$$

また、#1 反射鏡への入射電界の放射パターンは $E_i(\hat{\phi})$ 、要求の放射パターンは式 (A.1) の $E_R(\hat{\theta})$ であるから、電力一定の条件より

$$\frac{\int_0^{\hat{\phi}} E_i^2(\hat{\phi}) \sin \hat{\phi} d\hat{\phi}}{\int_0^{\hat{\phi}_0} E_i^2(\hat{\phi}) \sin \hat{\phi} d\hat{\phi}} = \frac{\int_0^{\hat{\theta}} E_d^2(\hat{\theta}) \sin \hat{\theta} d\hat{\theta}}{\int_0^{\hat{\theta}_0} E_d^2(\hat{\theta}) \sin \hat{\theta} d\hat{\theta}} \quad (\text{A.4})$$

となる。ここで、電力パターン $E_i(\hat{\phi})$ を次のように近似する。

$$E_i^2(\hat{\phi}) = \cos^m \hat{\phi} \quad (\text{A.5})$$

上式と式(A4.1)を(A4.4)に代入することにより

$$\tan \frac{\hat{\theta}}{2} = \tan \frac{\hat{\theta}_0}{2} \sqrt{\frac{1 - \cos^{m+1} \hat{\phi}}{1 - \cos^{m+1} \hat{\phi}_0}} \quad (\text{本文中式 (4.14h)}) \quad (\text{A.6})$$

次に、Ⅱの楕円鏡上の点 A における反射の条件を求める。図 A.1 において F_0 から A までの距離を \hat{P} とすると

$$\hat{P} = \frac{1+e_1}{1+e_1 \cos \hat{\phi}} \hat{P}_1 \quad (\text{A.7})$$

点 A での反射光線が Z 軸となす角を $\hat{\phi}'$ とすると反射の条件は次のようになる。

$$\frac{1}{P} \frac{d\hat{P}}{d\hat{\phi}} = \tan \frac{\hat{\phi} - \hat{\phi}'}{2} \quad (\text{A.8})$$

ここで、 $\hat{\phi}, \hat{\phi}'$ には次の関係がある。

$$\tan \frac{\hat{\phi}}{2} = \frac{1-e_1}{1+e_1} \tan \frac{\hat{\phi}}{2} \quad (\text{A.9})$$

従って、反射の条件を満足させるためには、式(A4.8), (A4.9)より次式が得られる.

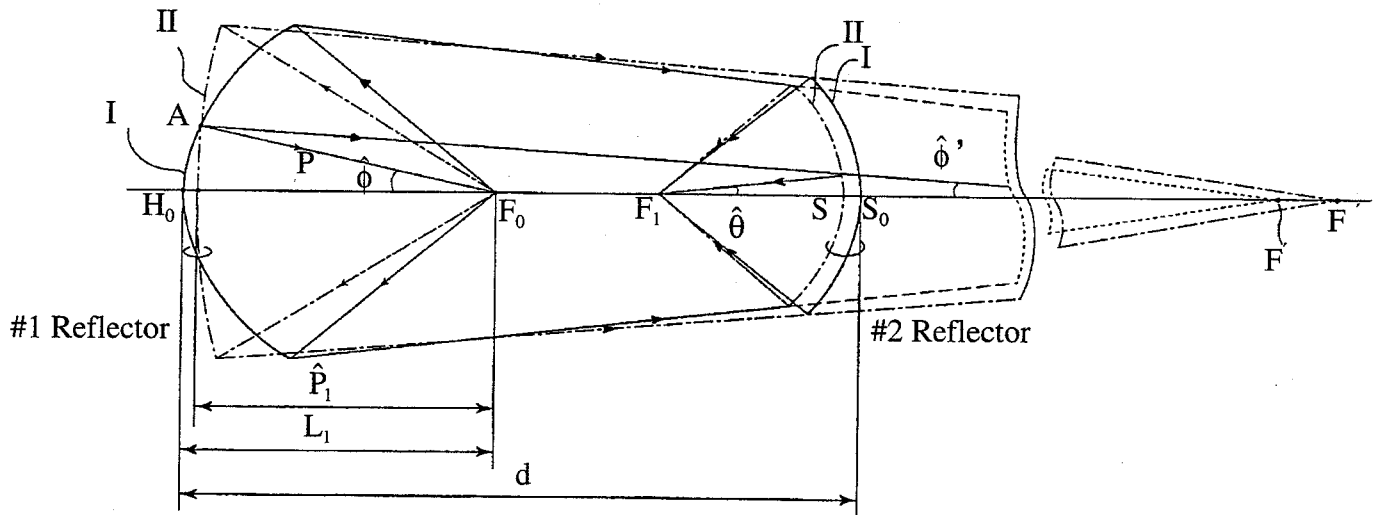
$$\frac{1}{\hat{P}_1} \frac{d\hat{P}_1}{d\hat{\phi}} + \frac{1-\cos \hat{\phi}}{(1+e_1 \cos \hat{\phi})(1+e_1)} \frac{de_1}{d\hat{\phi}} = 0 \quad (\text{A.10})$$

ここで、式(A.3)および次の関係式

$$\tan \frac{\hat{\theta}}{2} = \frac{(e_2+1)(1-e_1)}{(e_2-1)(1+e_1)} \tan \frac{\hat{\phi}}{2} \quad (\text{A.11})$$

より $\frac{de_1}{d\hat{\phi}}$ が求められ、結局本文の式(4.14a)が得られる.

なお、以上は開口分布を一様とした場合について述べたが、任意の分布にも式(A.1), (A.2)にその条件を与えることによりこの方法を拡張できる.



- I : Before reflector shaping
 #1: Ellipsoidal reflector (F_0, F')
 #2: Hyperboloidal reflector (F', F_1)
 II : After reflector Shaping
 #1: Ellipsoidal reflector (F_0, F'')
 #2: Hyperboloidal reflector (F'', F_1)

図 A-1 鏡面修整系
 Fig. A-1 Shaped reflector system

B 第6章の式の導出

電流分布法による放射パターンの計算

本文6章の図6.1(a), (b)で原点 O を基準として鏡面上の点 M を示すベクトルを元の鏡面の場合を \mathbf{l}_2 とすれば, この鏡面について法線ベクトル \mathbf{n}_m , 面素 $d\mathbf{S}_m$ は鏡面の中央部, 周辺部について, 次のようになる. まず中心部は次式で示される.

$$\mathbf{n}_m d\mathbf{S}_m = \frac{\partial \mathbf{l}_2}{\partial \theta_2} \times \frac{\partial \mathbf{l}_2}{\partial \phi_2} d\theta_2 d\phi_2 = \frac{\mathbf{f} - C_8 \mathbf{e}_{rw}}{(\mathbf{f} \cdot \mathbf{e}_{rw}) - C_8} (r_{m1})^2 \sin \theta_2 d\theta_2 d\phi_2 \quad (\text{B.1})$$

また周辺部は次式で示される.

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_m d\mathbf{S}_m &= \frac{\partial \mathbf{l}_2}{\partial \theta_2} \times \frac{\partial \mathbf{l}_2}{\partial \phi_2} d\theta_2 d\phi_2 = \frac{\mathbf{f} - C_8 \mathbf{n}_p - s_p \mathbf{e}_t}{(\mathbf{f} \cdot \mathbf{e}_n) - C_8} (\alpha_1 r_{m1} + \beta_1 s_p) ds_p d\phi_2 \\ \alpha_1 &= \frac{\sin \theta_2}{\cos \chi} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2 \sin^2 \chi} \\ \beta_1 &= \frac{\cos \theta_2 \left(1 - \frac{d\chi}{d\phi_2} \right)}{1 - \sin^2 \theta_2 \sin^2 \chi} \\ \tan \chi &= \frac{d(\log \tan \theta_2)}{d\phi_2} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

ここで $\mathbf{l}_2 = r_{m1} \mathbf{e}_{rw}$ (鏡面中心部), $\mathbf{l}_2 = r_{m1} \mathbf{n}_p + s_p \mathbf{e}_t$ (周辺部) である.

次に変形後について考える. 図6.1(b)の鏡面座標系で原点 O を基準として変形後の鏡面上の点 \bar{M} を示すベクトルを $\bar{\mathbf{l}}_2$ とすれば, これらは次のようになる.

$$\bar{\mathbf{l}}_2 = \mathbf{l}_2 + \Delta \mathbf{r}_m \quad (\text{B.3})$$

すなわち,

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{I}}_2 &= (\mathbf{r}_{m1} + \Delta \mathbf{r}_{m1}) \mathbf{e}_{rw} && \text{(鏡面中心部)} \\ &= (\mathbf{r}_{m1} + \Delta \mathbf{r}_{m1}) \mathbf{n}_p + s_p \mathbf{e}_t && \text{(周辺部)}\end{aligned}\tag{B.4}$$

ここで, \mathbf{e}_{rw} , \mathbf{n}_p は前述の単位ベクトル, \mathbf{e}_t は周辺部の接線方向の単位ベクトルである. 変形後の鏡面の $\bar{\mathbf{n}}_m d\mathbf{S}$ は式(B.4)を式(B.1), (B.2)の \mathbf{I}_2 に代入することにより得られる.

図 6.2 の座標系で点 $\bar{\mathbf{M}}$ の座標を (R, θ, ϕ) とすれば, 一次放射器からの入射磁界 \mathbf{H}_i は次式で与えられる.

$$\mathbf{H}_i = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\exp(-jkR)}{R} (E_\theta \mathbf{e}_\phi - E_\phi \mathbf{e}_\theta)\tag{B.5}$$

ここで, E_θ , E_ϕ はそれぞれ一次放射器の θ , ϕ 方向の電界成分, \mathbf{e}_θ , \mathbf{e}_ϕ はそれぞれ θ , ϕ 方向の単位ベクトルである.